



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA**

UNAN - MANAGUA

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Departamento de Tecnología

Ingeniería en Geología

Tema:

“Evaluación de la Relación entre el Contenido de Arsénico en Aguas Subterráneas y Fallamiento Geológico en los alrededores de la Laguna de Apoyo, Catarina, Nicaragua”

Monografía para optar al Título de Ingeniera en Geología

Autora:

Br. Andrea Esnelda Benavides Fierro

Tutora:

PhD Heyddy Loredana Calderón Palma

Asesoras:

MSc. Juliana Galeano Pardo

MSc. Eveling Espinoza

Managua, enero 2020

Dedicatoria

A Dios, quien ha estado conmigo desde antes de nacer y ha guiado mi camino y me ha llevado hasta donde estoy.

A mi bella madre Esnelda Fierro, quien ha luchado por mi valientemente y se ha sacrificado para ayudarme a ser quien soy.

A mi hermana Marcela, a quien deseo guiar por un buen camino y apoyarla.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios quien nunca me desamparó.

A mi familia por apoyarme siempre, especialmente a mi madre, mi hermana y mi papá.

A mis maestros por transmitirme sus conocimientos durante mi carrera universitaria y enseñarme a ser un buen profesional.

A mi tutora PhD Calderón Palma por sus enseñanzas durante la elaboración de la tesis, por su dedicación, tiempo, su paciencia y el compromiso.

A mis asesoras la MSc Eveling Espinoza por sus aportes en material, sus comentarios y correcciones. A la MSc Juliana Galeano Pardo a quien le doy infinitas gracias por sus consejos, su tiempo, sus enseñanzas, la paciencia, el cariño y el compromiso para la culminación de este trabajo monográfico.

Al Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO/UNAN-Managua) por permitirme realizar mi tesis monográfica con ellos y el apoyo económico en los gastos de campo, y todo el equipo para el desarrollo de este trabajo, gracias a todo el personal docente y administrativo quienes fueron de gran apoyo, en especial al Ing. Enrrique Navarro quien me apoyo durante la etapa de campo, a la Ing. Marjouri Toruño por sus valiosos consejos y aportes, al Ing. Erick Obando por todo el apoyo logístico y sus conocimientos en informática y electrónica que fueron de aporte valioso, a la Ing. Greyci Aldana por su apoyo, al Br Juan Bautista por apoyarme durante una etapa de campo.

Agradecer también a las instituciones de la UNAN-Managua como el Laboratorio de Biotecnología en especial a la MSc. Maybis López, quienes fueron de ayuda para la obtención de soluciones químicas. Al laboratorio Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos por su contribución en los análisis de isótopos.

Agradecer a la Alcaldía de Catarina por el apoyo logístico, el apoyo durante las etapas de campo, gracias al el Ing. Erick Jiménez por ser un gran apoyo, sus consejos y su tiempo brindado durante el transcurso de la elaboración del trabajo monográfico.

ÍNDICE

Capítulo I	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos de investigación	6
1.4.1. General.....	6
1.4.2. Específicos	6
Capítulo II	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Marco Teórico	10
2.2.1. Tectónica Regional de Centro América y Nicaragua	10
2.2.2. Marco Geomorfológico Regional	16
2.2.3. Geomorfología local de la Laguna Apoyo.....	19
2.2.4. Geología local de la Laguna de Apoyo.....	23
2.2.5. Origen de la Caldera Laguna Apoyo	32
2.2.6. Hidrología de la Laguna de Apoyo.....	34
2.2.7. Hidrogeología de la Laguna de Apoyo	36
2.2.8. Hidroquímica de aguas subterráneas	38
2.3. Marco conceptual	40
2.4. Hipótesis de investigación	48
Capítulo III	49
3.1. Diseño metodológico	49
Capítulo IV	53
4.1. Análisis y discusión de resultados	53
4.1.1. Fotointerpretación	53
4.1.2. Estratigrafía del área de estudio.....	55
4.1.3. Geología-estructural.....	59
4.1.4. Inventario de Pozos.....	64
4.1.5. Hidrogeología	66
4.1.6. Hidroquímica de las aguas subterráneas	68
4.1.7. Composición isotópica.....	71
4.1.8. Modelo Conceptual	74
Capítulo V	78
5.1. Conclusiones	78
5.2. Recomendaciones	80

	iii
Referencias	81
Anexos	
Medidas de recomendación para reducir las concentraciones de As en las aguas subterráneas.....	
Manual instructivo para realizar pruebas de Arsénico en aguas.....	
Recopilación de información y equipo utilizado	
Pozos inventariados	

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Validación del Digital Arsenator</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 2. Inventario de pozos.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 3. Resultados de isótopos.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4. Resultados de la aplicación del Filtro Kanchan.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 5. Recopilación de información.....</i>	<i>73</i>

Lista de figuras

<i>Figura 1. Provincias Geológicas de Nicaragua.</i>	15
<i>Figura 2. Provincias Geomorfológicas de Nicaragua</i>	18
<i>Figura 3. Mapa geomorfológico del área de estudio.</i>	22
<i>Figura 4. Mapa geológico del área de estudio.</i>	28
<i>Figura 5. Proceso de formación de calderas.</i>	33
<i>Figura 6. Balance hídrico de la Laguna de Apoyo.</i>	37
<i>Figura 7. Diagrama de Piper.</i>	39
<i>Figura 8. Afectación del Arsénico</i>	42
<i>Figura 9. Relación entre $^{18}\delta$ y $^{2}\delta$</i>	47
<i>Figura 10. Área de estudio.</i>	47
<i>Figura 11. Resultados de foto-interpretación.</i>	54
<i>Figura 12. Falla normal desplazando estrato de pómez.</i>	56
<i>Figura 13. Litología del área.</i>	56
<i>Figura 14. Litología del área.</i>	57
<i>Figura 15. Columna litológica del área de estudio.</i>	58
<i>Figura 16. Diagramas de Rosas.</i>	60
<i>Figura 17. Fracturas encontradas en el área de estudio.</i>	61
<i>Figura 18. Movimientos de masa.</i>	63
<i>Figura 19. Inventario de pozos.</i>	65
<i>Figura 20. Mapa piezométrico</i>	67
<i>Figura 21. Conductividad Eléctrica Vs Arsénico</i>	68
<i>Figura 22. Línea de mezcla.</i>	72
<i>Figura 23. Línea meteórica.</i>	73
<i>Figura 24. Modelo conceptual en pozos sin As.</i>	76
<i>Figura 25. Modelo conceptual en pozos con As.</i>	77
<i>Figura 26. Componentes del filtro Kanchan</i>	68
<i>Figura 27. Componentes del Filtro Kanchan</i>	69
<i>Figura 28. Equipo para inventario de pozos.</i>	75
<i>Figura 29. Pozo de la Alcaldía de Catarina.</i>	76
<i>Figura 30. Pozo Estación Richardson.</i>	77
<i>Figura 31. Pozo Quinta Bladimir Rosales.</i>	78
<i>Figura 32. Pozo Monte Cristo</i>	79
<i>Figura 33. Pozo Topochiva.</i>	80
<i>Figura 34. Pozo Villa Serena.</i>	81
<i>Figura 35. Pozo Casa de Verano.</i>	82
<i>Figura 36. Pozo Quinta El Carmelo.</i>	83
<i>Figura 37. Pozo Punta El Cacique.</i>	84
<i>Figura 38. Pozo Casa Martha</i>	85
<i>Figura 39. Pozo Juan José Romero.</i>	86
<i>Figura 40. Pozo Quinta Meneses.</i>	87
<i>Figura 41. Pozo Bar y Restaurante María</i>	88

	v
<i>Figura 42. Pozo Cuerpo de Paz.....</i>	89
<i>Figura 43. Pozo Restaurante Los Ranchos.....</i>	90
<i>Figura 44. Pozo Casa de las Aves</i>	91
<i>Figura 45, Pozo Ernesto Cordero</i>	92
<i>Figura 46. Pozo Laguna Shore Guesthouse</i>	93
<i>Figura 47. Mapa de trabajo en campo.</i>	122

Capítulo I

1.1. Introducción

En Nicaragua existen numerosas riquezas naturales, entre las más destacadas está la Cadena Volcánica Cuaternaria y los dos grandes Lagos Cocibolca y Xolotlán, que se ubican en el Pacífico del país. La zona del Pacífico alberga la mayor parte de lagunas y lagos del país. Así mismo, es de donde se obtiene el mayor porcentaje de fuentes de aguas subterráneas existentes en el país, debido a las condiciones litológicas. En Nicaragua existen 14 lagunas cratéricas las cuales son calificadas como patrimonio natural, el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA) en la norma NTON 05 002-99 considera a estos ecosistemas acuáticos de origen volcánico muy frágiles y susceptibles a impactos de contaminación, eutrofización y sedimentación (NTON 05 002-99, s.f.).

La Laguna de Apoyo es considerada como la laguna cratérica más grande de Nicaragua con un área de 21 km² (Calderón Palma & Flores Meza, 2010). A las orillas de la Laguna se puede evidenciar el incremento de viviendas y hoteles, lo que implica un impacto en la escorrentía de aguas superficiales con las construcciones de nuevas viviendas y carreteras, que comprende la descarga de aguas residuales y aumento en el uso de sus aguas. Este cuerpo de agua se encuentra naturalmente presenta altos niveles de salinidad (mayores a 800 µS/cm) y un alto contenido de Arsénico (As) (120 µg/l); el valor máximo admisible para concentración de este metaloide para consumo humano es de 10 µg/l, lo que restringe su uso únicamente para recreación. En estudios anteriores realizados en las aguas de la Laguna Apoyo y en aguas subterráneas alrededor se ha evidenciado este alto contenido de As (Calderón Palma & Flores Meza, 2010; Parello et al., 2008; Vázquez, Ortega, Marín, & Cerrato, 2007).

Esta investigación se enfoca el área del Plan de la Laguna de Apoyo, ubicada en el Pacífico de Nicaragua, entre el Complejo Volcánico Masaya y el Volcán Mombacho, específicamente en una franja de aproximadamente 1.5 km² en el Norte y Noroeste de la

laguna; ésta tiene un importante potencial turístico ya que brinda un paisaje exótico, tiene un espejo de agua color azul intenso con laderas frondosas, se tiene alrededor de ella también varios sectores turísticos donde se puede apreciar este paisaje hacia la Laguna. En el sitio se encuentran una variedad de biodiversidad y especies endémicas como la mojarra flecha, la mojarra chanco, pequeña y costera (CLUSA & FUNDECI/GAIA, 2009).

Considerando que las aguas subterráneas en el área de Apoyo y los pozos alrededor de la misma se encuentran contaminadas por arsénico (As), tomando en cuenta también la presencia de fallas tanto radiales por su origen volcánico como fallas regionales (Vázquez et al., 2007) se tiene el objetivo principal donde se determinó si existe relación con las concentraciones de As y la presencia de fallas y/o fracturas geológicas en el área de estudio.

1.2.Planteamiento del problema

La problemática a abordar en el área de estudio se basa en las diferentes concentraciones de As en el agua subterránea de los pozos analizados, estos muestran tener altas concentraciones en un sector Norte de la Laguna, y en un sector Noroeste estas concentraciones son menores radicalmente.

Los resultados que se han obtenido demuestran que muchos de los pozos tienen valores de concentración por encima de lo recomendado para el consumo humano ($10 \mu\text{g/l}$), esto presenta un problema para los pobladores y los hoteleros del área, ya que, al tener pozos con aguas no aptas para su consumo crea un déficit en su abastecimiento. Esta laguna es un sistema de cuenca muy complejo, delimitado por varias fallas geológicas en sus alrededores; fallas que probablemente estén conectadas hidráulicamente al origen de este contaminante natural.

En consecuencia, todo lo mencionado con anterioridad conlleva a la formulación del problema que se engloba en la siguiente pregunta: *¿Las estructuras de fallas en la zona Norte y Noroeste de la Laguna de Apoyo están conectadas de alguna manera a la presencia de altos y bajos niveles de As en las aguas subterráneas?*

1.3. Justificación

En el 2017 la UNESCO reportó en su página web¹ que la contaminación natural por As en agua potable es considerada como una amenaza en más de 70 países de todos los continentes, afectando alrededor de 140 millones de personas; por ejemplo, en Bangladesh cerca de 70 millones de personas se encuentran expuestas a aguas que contienen más de 10 µg/l de As, otros países que presentan este problema de contaminación son: Chile, China, Estados Unidos, Hungría, India, Japón, México, Taiwán y Vietnam (Carabantes & Fernicola, 2003).

En Nicaragua se realizó un estudio a nivel nacional de contaminación por As en 8 localidades, de las cuales 6 se confirmaron con este contaminante las cuales son: El Mojón en San Francisco del Norte, Comunidad Cerro Mina de Agua ambos sitios en Chinandega, Comunidad de EL Charco y Santa Rosa del Peñón, Comunidad La Cruz de la India y Las Pilas y la Comunidad de Kinuma en Chontales, se calculó una afectación de 1,270 personas estimando que el 5.7% de los puntos de abastecimiento de agua tienen valores de este As total por encima del valor máximo admisible de 10 µg/l (UNICEF, 2004).

La presencia de As en las aguas subterráneas que están siendo consumidas presenta un grave daño, su exposición prolongada puede causar graves enfermedades. En un escrito en la página web de la OMS² indica que el agua contaminada por As no puede ser utilizada para consumo humano, tampoco en ganadería o riego de plantas. Una prolongada exposición a este metal inorgánico (principalmente si es en los usos antes mencionados) podría causar una intoxicación crónica, los efectos más significativos son aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel; este elemento químico es una de las 10 sustancias químicas más alarmantes para la salud pública estableciendo un límite máximo en el agua de 10 µg/l. En

¹<http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-41-natural-arsenic-pollution/>

² <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

Nicaragua también existe un valor máximo admisible para la concentración de este metaloide en las aguas, establecido por las Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano como un máximo de 0.01 mg/l (CAPRE, 2010).

La situación medio ambiental del país es indudablemente un tema de mucha relevancia, ya que se involucra a toda la sociedad, tanto a los pobladores como a instituciones públicas y privadas. En la Laguna de Apoyo la demanda de agua para consumo humano va aumentando, esto debido a que la Laguna tiene un alto potencial turístico por su belleza paisajística, y su biodiversidad; sin embargo, para que el desarrollo turístico sea potencial los pobladores y hoteles requieren indispensablemente agua potable. Es por eso que este estudio pretende determinar si el origen del arsénico está relacionado con fallas geológicas, para identificar zonas donde es menos probable encontrar altas concentraciones de As y que las autoridades locales puedan planificar la perforación de futuros pozos seguros.

En el área de estudio se han realizado estudios donde revelan la existencia de contaminación de las aguas subterráneas de pozos, esto presenta un problema ya que las personas utilizan el agua para consumo, para lavar utensilios domésticos, riego, lavar alimentos, bañarse, entre otros. Con este estudio se logró obtener información de las concentraciones de As y el uso que se brinda a cada pozo.

1.4. Objetivos de investigación

1.4.1. General

- Evaluar la relación que existe entre el contenido de Arsénico en aguas subterráneas y el fallamiento geológico en los alrededores de la Laguna de Apoyo.

1.4.2. Específicos

- Caracterizar los tipos de estructuras geológicas en el área de estudio.
- Identificar pozos contaminados por arsénico en el área de estudio.
- Correlacionar la ubicación de los pozos contaminados y las fallas geológicas.
- Recomendar opciones para la reducción de As en aguas contaminadas de los pozos usados para consumo humano.

Capítulo II

2.1. Antecedentes

Sussman, (1985) “*Apoyo Caldera, Nicaragua: A Major Quaternary Silicic Eruptive Center*” La Caldera Apoyo se formó por dos fases de colapso después de erupciones explosivas de piedra pómez dacítica hace unos 23,000 años. Las evidencias de campo sugieren una secuencia de erupción pliniana seguida del colapso de la columna de erupción, generando una compleja oleada piroclástica y depósitos de ignimbrita, donde inicia el colapso de la caldera.

Krasny & Hecht, (1998) “*Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacífico de Nicaragua*”, describe los sistemas de acuíferos donde se menciona en el sub sistema acuífero Granada-Tipitapa a la Laguna Apoyo indicando que está en una de las dos zonas de descarga hacia el acuífero de Granada. La cuenca de la Laguna Apoyo en su zona de descarga es abierta hacia el Lago Cocibolca, sin embargo, su zona de recarga es de poca extensión; cerca de la Laguna en la parte occidental y meridional existen barreras hidrogeológicas que impiden un flujo de agua subterránea importante. La composición de las aguas de Apoyo formada por un conjunto importante de componentes profundos (origen volcánico) no está diluido suficientemente por aguas de bajo contenido de sólidos disueltos (SD³), y a consecuencia de esto las aguas subterráneas que fluyen de Apoyo hacia el Lago Cocibolca contienen alto porcentaje de SD.

Vammen et al., (2005) “*Informe sobre el Lago de Apoyo, Limnología, Calidad de agua, Hidrogeología e Hidrogeoquímica*” La cuenca de la Laguna Apoyo tiene aproximadamente 38 km² en su parte superficial, limitada por sus laderas, por lo que su subsistencia superficial está limitada a la precipitación directa hacia su espejo de agua. El sistema hidrogeológico de la Laguna Apoyo es complejo, ya que se encuentra entre la Caldera Las

³ Sólidos Disueltos

Sierras y la Caldera Masaya con depósitos piroclásticos y lavas. Se distingue el medio por fracturas en las tobas consolidadas del Grupo Las Sierras y en lavas de Masaya y Apoyo.

Vázquez et al., (2007) realizaron una investigación titulada: *“Estudio Hidrogeológico y Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca de la Laguna de Apoyo, Nicaragua”* donde se determinaron concentraciones de As en pozos cercanos a la Laguna Apoyo los cuales indican que los niveles son elevados los cuales sobre pasan lo recomendado por las normas CAPRE. En el sector noroeste de la Laguna, se tienen dos pozos con concentraciones de arsénico, el pozo “Escuelita” con 4.65 µg/l el de menor concentración y el pozo “Junto a pulpería Gloria” con 54.54 µg/l. El punto con mayor concentración se arsénico se registró en el centro de la Laguna con 120 µg/l.

Espinoza, E (2008) *“Cartografía Geológica en la Reserva Natural Laguna de Apoyo y sus alrededores”* describe que en el área de La Laguna Apoyo se diferencian once unidades lito-estratigráficas, las cuales coinciden con las unidades geomorfológicas alineadas. Están constituidas por litología volcánica con características diferentes las cuales son equivalentes al complejo volcánico Masaya -Grupo Masaya-, del volcanismo del lineamiento Granada-Nandaime –Grupo Granada Nandaime-, de la Caldera de Apoyo Grupo de Apoyo-Grupo Pre–Apoyo y Grupo Las Sierras de edad plioceno-pleistoceno.

Parello et al., (2008) *“Geochemical Characterization of Surface Waters and Groundwater Resources in the Managua área (Nicaragua, Central America)”* realizaron una caracterización geoquímica en fuentes de aguas superficiales y subterráneas en el área de Managua, sitio que abarca también la Laguna Apoyo. En los estudios que realizados se arrojaron resultados de As para la Laguna Apoyo los cuales son de 120 µg/l.

Calderón Palma & Flores Meza, (2010) *“Evaluación de la Dinámica de la Laguna de Apoyo Mediante Trazadores Isotópicos y Geoquímicos”* realizaron un estudio de la dinámica de la Laguna de Apoyo mediante trazadores isotópicos y geoquímicos, donde indican que la presencia de arsénico (As) en las aguas subterráneas varía de 4.65 a 54.40 µg/l, en este estudio relacionan las concentraciones de arsénico con la presencia de fallas y termalismo en la zona. Indicando también que la Laguna podría ser una fuente de contaminación a los pozos ubicados en el área de descarga. La hidroquímica de las aguas subterráneas de la Laguna se clasifican como Cl-Na⁺.

Espinoza Altamirano, (2005) *“Distribución de la Contaminación Natural por Arsénico en las aguas subterráneas de la Sub Cuenca Suroeste del Valle de Sébaco, Matagalpa-Nicaragua”* donde se analizaron 57 pozos del cual el 36% supera el límite admisible para consumo humano, se hicieron análisis de As en agua, roca y suelo. Estas concentraciones se asocian a procesos naturales singenéticos y epigenéticos a lo largo de fallas y fracturas NE y NO.

UNICEF, (2004) realizó el estudio: *“Contribución al Estudio de Cinco Zonas Contaminadas Naturalmente por Arsénico en Nicaragua”* a nivel nacional de los contaminantes de Arsénico, Plomo y Flúor presentes en las aguas subterráneas, donde el principal contaminante que se presentó fue el arsénico, se estimó que el 5.7% de los puntos de abastecimiento de agua tienen valores de arsénico total por encima del límite máximo establecido por la OMS⁴.

⁴ Organización Mundial de la Salud

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Tectónica Regional de Centro América y Nicaragua

América Central se define como una plataforma que va desde Guatemala hacia el Este y Sur hasta las tierras bajas del Río Atrato en Colombia, abarca el territorio de Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, incluyendo también al país Belice (Well, 1980). Centroamérica puede dividirse en dos grandes unidades las cuales se diferencian completamente, tanto por su historia como por su estructura geológica; la parte norte que contiene a los países de Guatemala, Honduras, El Salvador y el Norte de Nicaragua, aquí se exhibe una corteza continental con rocas metamórficas y plutónicas de edad Paleozoica o incluso más antiguas. Durante el Terciario esta región se convirtió en la corteza actual. El sur de Centroamérica abarca las Repúblicas de Costa Rica y Panamá. Es fundamentalmente diferente en su desarrollo geológico y por lo tanto en su estructura del norte de América Central. No hay ningún basamento cristalino del Paleozoico ni cobertura de depósitos continentales y epicontinentales del Paleozoico Superior y del Mesozoico (Well, 1980).

La Depresión de Nicaragua es una zona de arrastre que se extiende desde la costa caribeña en Costa Rica en el suroeste de Nicaragua hasta el Golfo de Fonseca y continúa hasta El Salvador en forma de fallas. Se relaciona muy estrechamente con la cadena volcánica cuaternaria. En el norte de América Central, el basamento cristalino está conformado por rocas metamórficas y plutónicas intercaladas muy bien extendidas desde Chiapas en México, a través del centro de Guatemala hasta las partes norte y noreste de Honduras y hacia el norte de Nicaragua, la principal área esta demarcada en el norte por la falla Chixoy Polochic, y en el sur por la falla de Jocotán Chamelecón. Se entiende que la falla Motagua separa regiones de diferentes facies rocosas entre sí, lo que se conoce como Bloque Maya en el norte y el Bloque Chortis en el sur (Well, 1980).

La Provincia de la Depresión de Nicaragua forma parte de la zona marginal del Pacífico de América Central, la cual se caracteriza por trincheras profundas, regiones de plataforma, cadenas volcánicas, terremotos y fallas activas. Esta Depresión aparece más claramente como un graben morfológico en la ciudad de Managua, en el suroeste de la Cordillera costera con unos 250 m de altura, la cuesta de la falla Mateare, la cual se eleva a 900 m inclinándose levemente en la cresta del Pacífico. La geología histórica en Nicaragua inicia en la Era Paleozoica, culminando en el Cuaternario con una intensa actividad volcánica. Durante el paleozoico medio inferior y el mesozoico Centroamérica estaba conformada por dos grandes provincias geológicas, la Septentrional (al norte) y Meridional (al sur). La Provincia Septentrional cubre la parte norte de Nicaragua, representa una corteza continental asentada en rocas metamórficas paleozoicas. La Provincia Meridional comprendida al sur del país está constituida por una corteza oceánica con basamento de rocas ígneas básicas superpuestas por sedimentos marinos y volcánicos de edad terciaria (Fenzl, 1989).

Hodgson, (2000) describe la geología regional de Nicaragua, dividiendo en cinco Provincias geológicas en dependencia de su geomorfología, estratigrafía, geología tectónica, geología histórica, geología económica y depósitos minerales metálicos y no metálicos (Figura 1).

Provincia geológica de la Costa del Pacífico.

Esta provincia se localiza en el arco volcánico activo, entre la Depresión de Nicaragua y la Fosa Mesoamericana. Esta cuenca está rellena por depósitos sedimentarios neríticos, pelágicos y turbidíticos que se depositaron en el Cretácico Superior-Paleoceno donde se incluye Miembro Sapoá, Formación Rivas y Brito. También por materiales someros depositados en el Terciario- Neógeno donde se encuentra la Formación Masachapa, El Frayle y El Salto). El basamento continental de esta Provincia corresponde al Complejo Nicoya el cual está compuesto por esquistos negros, grawacas (volcánicas), serpentinita,

basaltos en almohadilla, lutitas, conglomerados, pedernal, intrusivo básico-intermedio y peridotita.

Provincia geológica de la Depresión de Nicaragua.

La Depresión Nicaragüense es el resultado de procesos tectónicos, los cuales se originaron en el contacto activo entre las Placas Coco y Caribe (Hradecky, 1997). Esta Provincia abarca todos los materiales que se depositaron en el Graben de Nicaragua y Managua, engloba la litología de los depósitos del Grupo Coyoil al NO centro y en la Isla Solentiname, también de la Formación Tamarindo, el Grupo La Sierra superior (Las Nubes), intermedia e inferior (basamento sobre el cual descansa Managua, la Cordillera de Diriamba, Carazo, área de Malpaisillo-La Paz Centro (Hodgson, 2000). El Graben de Nicaragua es una estructura tectónica joven con edad Plio-Pleistoceno, está limitado por dos sistemas de fallas con rumbo NO-SE, su origen está relacionado a la actividad volcánica del cuaternario, a la fosa mesoamericana y a la interacción entre las Placas Coco y Caribe; como consecuencia de la falla que provocó un hundimiento de las regiones entre las fracturas y el acompañamiento de vulcanismo. El Lago de Nicaragua y Managua originados por la estructura geomorfológica del graben ocupan un 40% de la Provincia (Fenzl, 1989). Dentro de esta provincia geológica se tiene la Cordillera Volcánica cuaternaria, los volcanes están compuestos por lavas andesíticas y basálticas, piroclastos del Cuaternario Inferior al reciente y tobas. El Graben de Managua se da por un conjunto de fallas (pull apart basin), donde se diferencian siete estratos que componen al Grupo Managua (Qm).

Provincia geológica Central.

Se encuentra dentro de la Provincia Meridional de América Central, geográficamente se conoce como las Tierras Altas del Interior (Fenzl, 1989). En esta provincia se pueden dividir tres secciones de acuerdo a los productos volcánicos: sección inferior compuesta por sedimentos volcánicos, brechas laháricas, lava andesítica y basáltica. Una sección intermedia correspondiente a la serie Matagalpa compuesta por lava andesítica-dacítica y depósitos piroclásticos del Mioceno inferior. Sección superior compuesta por ignimbrita andesítica y dacítica e intercalación de toba y delgadas capas de lava basáltica. Las rocas del Grupo Coyoil se originaron por fisuras cerca del borde de la Depresión (Hodgson, 2000).

Provincia geológica del Norte.

También llamada Plataforma Paleozoica y Mesozoica, se encuentra atravesada por la continuación de la falla Matiguás hacia el norte, y la zona de fractura de Isabelia por la zona de fractura Murra. Esta Provincia está constituida en el núcleo metamórfico por rocas Paleozoicas (esquistos, filitas, cuarzitas, pizarras y meta volcánicas), también por intrusivos del Cretácico-Terciario (granitos, granodioritas, dioritas, monzonita, cuarzo) (Fenzl, 1989). La Provincia se considera con las rocas metamórficas más antiguas del país, forma parte de América Central Nuclear que corresponde a las tierras montañosas antiguas falladas y plegadas, desde Chiapas hasta la provincia en Nicaragua. De acuerdo a su estructura e historia geológica ésta forma parte del continente norteamericano, evidenciado por la distribución de rocas anteriores del volcanismo Terciario Superior.

Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica.

Limitada al sur y noroeste por la Provincia Volcánica Terciaria, al oeste parcialmente por la plataforma Paleozoica y Mesozoica y al este por el mar Caribe. Se caracteriza por terrenos bajos, llanos y ondulados cubiertos por depósitos de grava y arena. Se tienen tres importantes características, la Cuenca Mosquitia (una de las más grandes de Centroamérica) donde se depositaron alrededor de 5,000 m de sedimentos del Terciario provenientes de la plataforma y áreas volcánicas antiguas, el Banco continental de Nicaragua y la Cuenca costera sedimentaria (Hodgson, 2000).

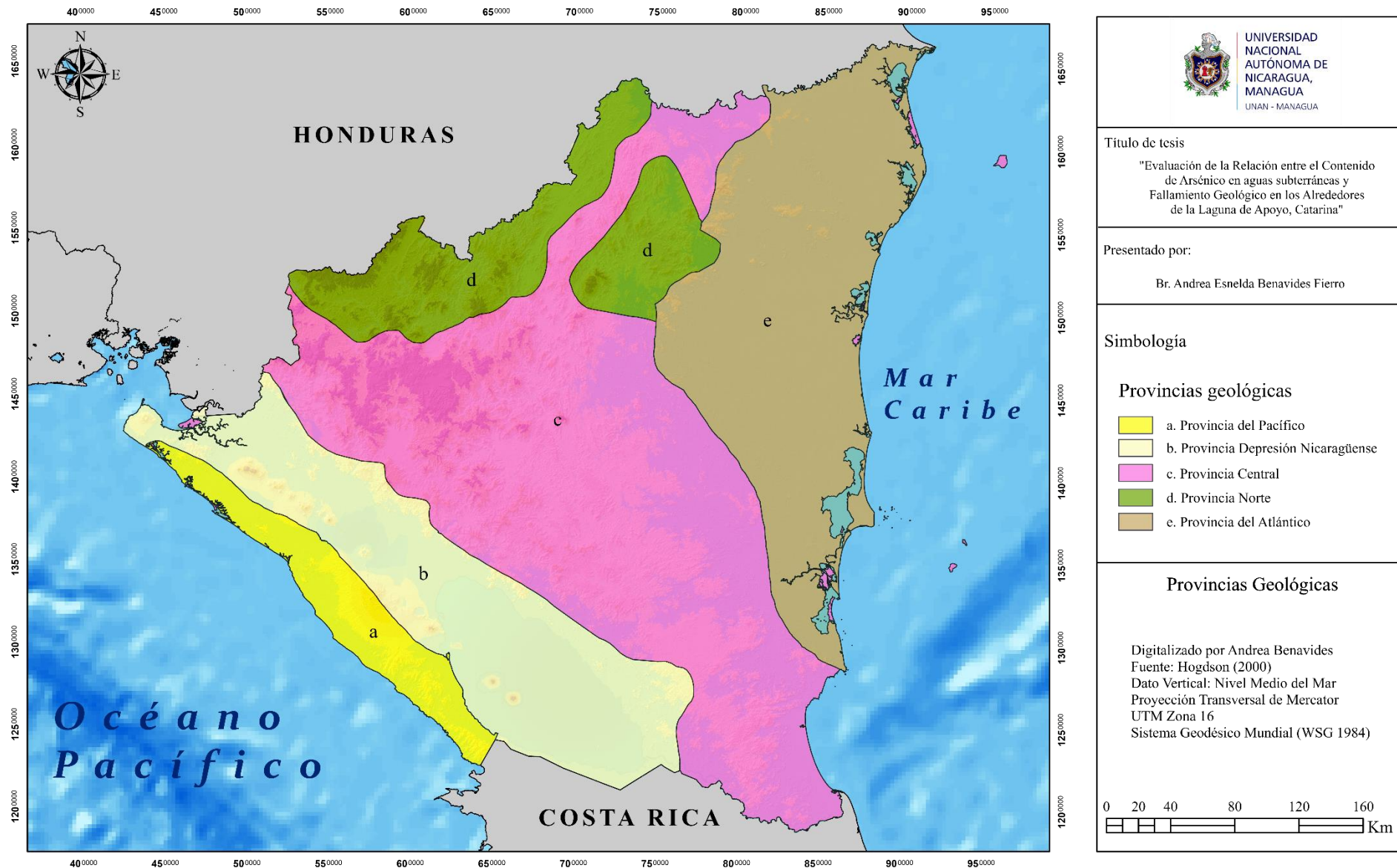


Figura 1. Provincias Geológicas de Nicaragua. Fuente: Hogdson (2000).

2.2.2. Marco Geomorfológico Regional

Según Fenzel (1989) Nicaragua desde el punto de vista geomorfológico regional puede dividirse en 5 provincias geomorfológicas principales (Figura 2).

Planicie Costera del Pacífico:

Comprende una franja estrecha delimitada a lo largo de la costa del Pacífico, la cual se extiende en dirección NE-SO desde el volcán Cosigüina (en el norte) hasta el istmo de Rivas (en el sur). En la parte norte la Provincia está representada por planicies con colinas aisladas y tiene de 10 a 35 km de ancho con elevaciones topográficas que van desde 0 a 200 m. En la parte sur se representan serranías y elevaciones desde 0 a 500 m. Dentro de esta provincia pueden identificarse Sub-Provincias como: colinas Buena Vista, mesas del Tamarindo, serranías del Pacífico, serranías de Brito y estribaciones de Orosí.

Cordillera Volcánica del Pacífico.

Se trata del rasgo geomorfológico más importante en el occidente de Nicaragua, constituida por una cadena de volcanes de edad cuaternaria hasta el reciente. Tiene orientación NO-SE y 300 km de longitud, extendiéndose desde el Volcán Cosigüina en el norte hasta el Volcán Maderas ubicado en el Lago de Nicaragua al sureste. Generalmente los volcanes son formados por conos compuestos pero aislados, se crean cráteres de colapso y calderas.

Depresión Nicaragüense.

Esta Provincia es un valle de relieve suave, se extiende desde el SE en frontera con Costa Rica hasta el Golfo de Fonseca en el NO; tiene de 30-45 km de ancho, su estructura de graben (fosa tectónica) se encuentra parcialmente cubierta por depósitos aluvionales y escombros volcánicos. Las zonas topográficas más bajas de esta Provincia están ocupadas por el Golfo de Fonseca, el Lago de Managua (Xolotlán) y el Lago de Nicaragua (Cocibolca).

Tierras Altas del Interior.

Comprende el 33% de la superficie del país, ubicada en el centro de Nicaragua, siendo topográficamente la región con más elevación, con relieve montañoso y accidentado. Esta se extiende desde el borde Nor-occidental de la Depresión Nicaragüense hasta la Llanura Atlántica. Se constituye por una amplia meseta volcánica disectada por ríos caudalosos, con elevaciones ente 500 y 2,000 metros. En el norte se encuentran numerosos valles intra montañosos, con formas de relieve de altiplanicies, mesas, cuevas, cordilleras, serranías, colinas aisladas, terrenos montañosos quebrados.

Llanura Costera del Atlántico.

Representa aproximadamente el 37% del país, se trata de una vasta llanura constituida principalmente por sedimentos del Terciario, limitada en el norte por el Río Coco y en el este por el Océano Atlántico. Esta Provincia presenta un relieve uniforme, sin accidentes topográficos relevantes. Morfológicamente esta provincia es una antigua penillanura submarina de relieve senil, moderadamente disectado. Dentro de la región se reconocen las sub provincias geomorfológicas: Llanos del Cabo Gracias a Dios, Llanos del Caribe y Llanos de San Juan del Norte.

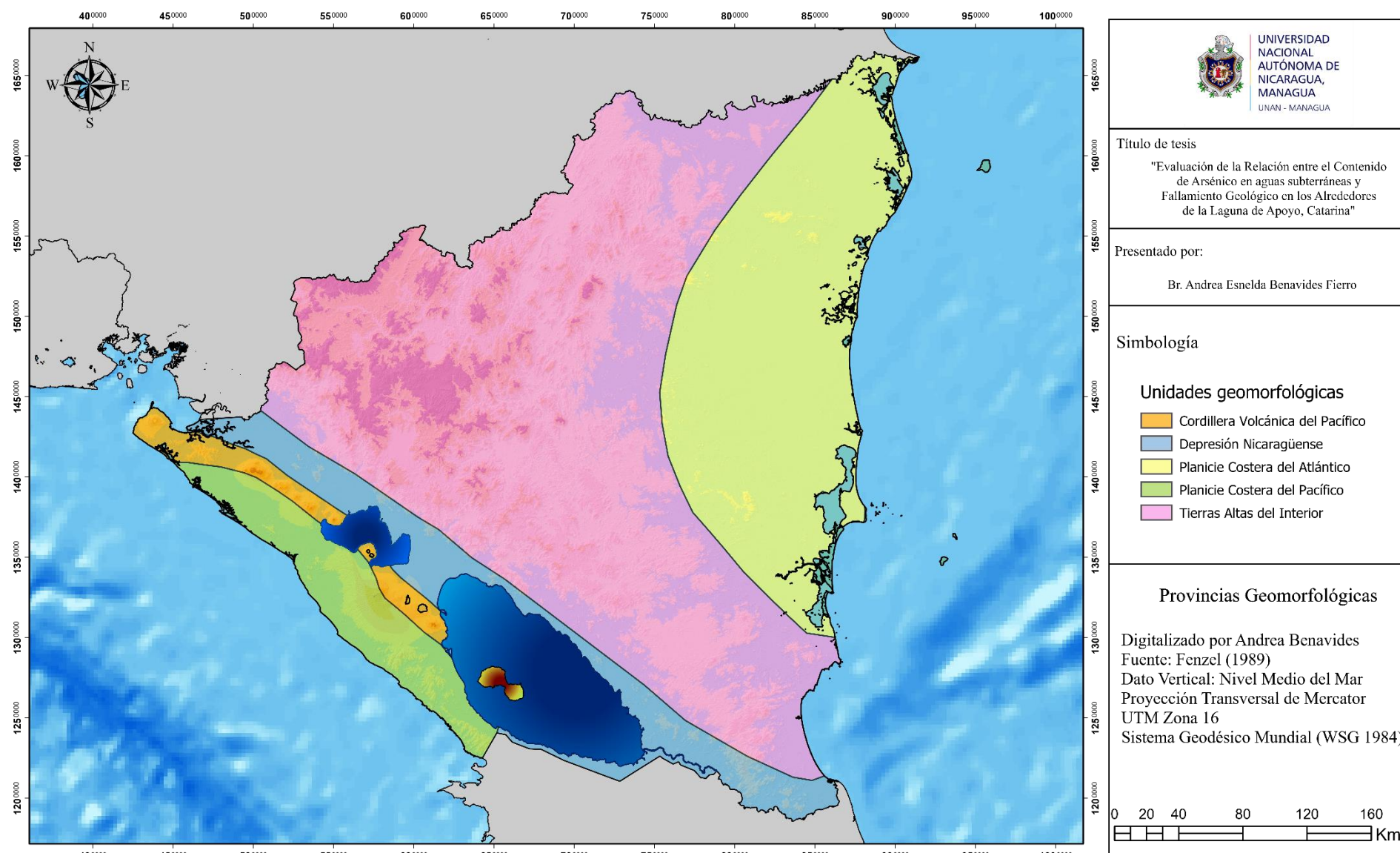


Figura 2. Provincias Geomorfológicas de Nicaragua. Fuente: Fenzel (1989)

2.2.3. Geomorfología local de la Laguna Apoyo

La Caldera de la Laguna de Apoyo es parte de la Provincia geomorfológica de la Cordillera Volcánica del Pacífico, la cual está alineada paralelamente a la Costa Pacífica y limitada con el borde suroeste de la Depresión de Nicaragua. La geomorfología está basada en la forma del relieve, que generalmente está determinado por la litología que lo conforma, las formas topográficas asociadas y el patrón de estructuras lineales y el drenaje. Se dividen cinco grandes unidades geomorfológicas (Figura 3), las cuales se diferencian por el relieve (Espinoza, E 2008).

Unidad de Origen Denudatorio.

Esta unidad tiene dos sub-unidades, una corresponde a una ladera suave de meseta, es una zona de transición que va desde el borde de la Caldera hasta las zonas más planas en los extremos del área, con pendientes que van de 0° a 10°. Tiene origen en la elevación provocada por las faldas del antiguo Volcán Pre Apoyo, el cual ha ido erosionándose con el tiempo y creando pendientes más suaves. La otra sub unidad corresponde a una peniplanicie que se localiza fuera del borde de la Caldera, se caracteriza por un relieve ondulado con pendientes menores. La topografía está cortada por drenajes que van hacia el Lago Cocibolca pasando por Granada.

Unidad de Origen Estructural.

Aquí se definen dos sub-unidades que corresponde una a escarpes por movimientos de masa definidos por las paredes con fuertes pendientes, las cuales han sido generadas por fenómenos de inestabilidad de laderas, erosión u cualquier otro movimiento que modifica el relieve; esta unidad se ubica de forma continua alrededor del borde de la Caldera y tiene su origen por la ruptura circular que se produjo tras el colapso de la Caldera Apoyo. La otra sub-unidad corresponde a laderas de fallas, las que se caracterizan por pendientes moderadas

de origen estructural representando el desplazamiento de fallas. Estas laderas presentan pendientes mayores de 30° iniciando desde el borde de la Caldera. Esto se puede observar en la parte sur correspondiente a los municipios de Diriá y Diriomo que presentan laderas en forma de escalones.

Unidad de Origen Volcánico.

En esta unidad se dividen cuatro sub-unidades, primero se tienen domos volcánicos ubicados en el municipio de Diriomo. Son tres elevaciones redondeadas significativas, la de mayor elevación El Cerrito con 420 m.s.n.m., se ha identificado que estas unidades fueron originadas por erupciones de tipo Peleanas, las cuales por su gran viscosidad se dio acumulación formando la estructura de domo; es significativo ya que los tres domos están alineados a fallas u otros centros eruptivos secundarios. La sub-unidad de conos cineríticos agrupa a cerros cuyo origen es por acumulación de piroclastos por repetidas erupciones volcánicas, estos cerros no están activos, pero sirven de referencia al paisaje volcánico de la zona. El Cerro Pacaya en Catarina, supone la mayor elevación (620 m.s.n.m.), y el Cerro El Chanal de menor elevación (180 m.s.n.m.). Se tiene un relieve relicto volcánico en la zona de Diriomo al sureste, el cual tiene zonas abruptas con elevaciones entre 210-460 m.s.n.m., se clasificó como relictos erosionales de Pre-Apoyo. También se presenta una planicie intervolcánica caracterizada por pendientes moderadas y topografía ondulada, lo que separa el paisaje de planicie al relieve volcánico abrupto de Diriomo y las faldas del Volcán Mombacho.

Unidad de Formación de caldera y estabilización de laderas.

Este se ha agrupado distinto al resto ya que el origen de este paisaje es una combinación de diversos procesos como el origen volcánico (erupción explosiva que vació la cámara magmática), estructural (colapso del edificio volcánico), erosivos y sedimentarios (erosión en áreas altas y acumulación en las áreas bajas). Se incluye el borde de la caldera, la ladera abrupta de caldera, ladera suave de caldera y zona de acumulación de remoción en masa.

Unidad origen Fluvio-Lacustre.

Dentro de ésta se tienen cuatro sub-unidades, el límite de erosión de quebrada que consiste en erosión hídrica con sistema radial dentro y fuera de la caldera donde la elevación relictas del Volcán Pre-Apoyo provoca que el borde del cráter funcione como la cabecera de todas las quebradas. Otra sub-unidad es la ladera abrupta de quebrada la que se representa en la zona externa de la caldera (Catarina, San Juan de Oriente y Diriá) en la zona oeste, y en el sector sur este (Veracruz, y Guapinol en Diriomo). Los abanicos aluviales activos o conos de deyección (sub-unidad) ubicados en San Juan de Oriente, Diriá y Granada con anchos que oscilan entre 35-60 m, y la sub-unidad de depósitos lacustres se asociada a la disminución del nivel de agua en la Laguna que ha expuesto en la zona terminal de las laderas de la caldera. Las pendientes son suaves (0-10°) pero se ven bruscamente afectadas por relieves abruptos de las terrazas. Esta unidad se presenta en todo el borde de la Laguna, formada por sedimentos lacustres.

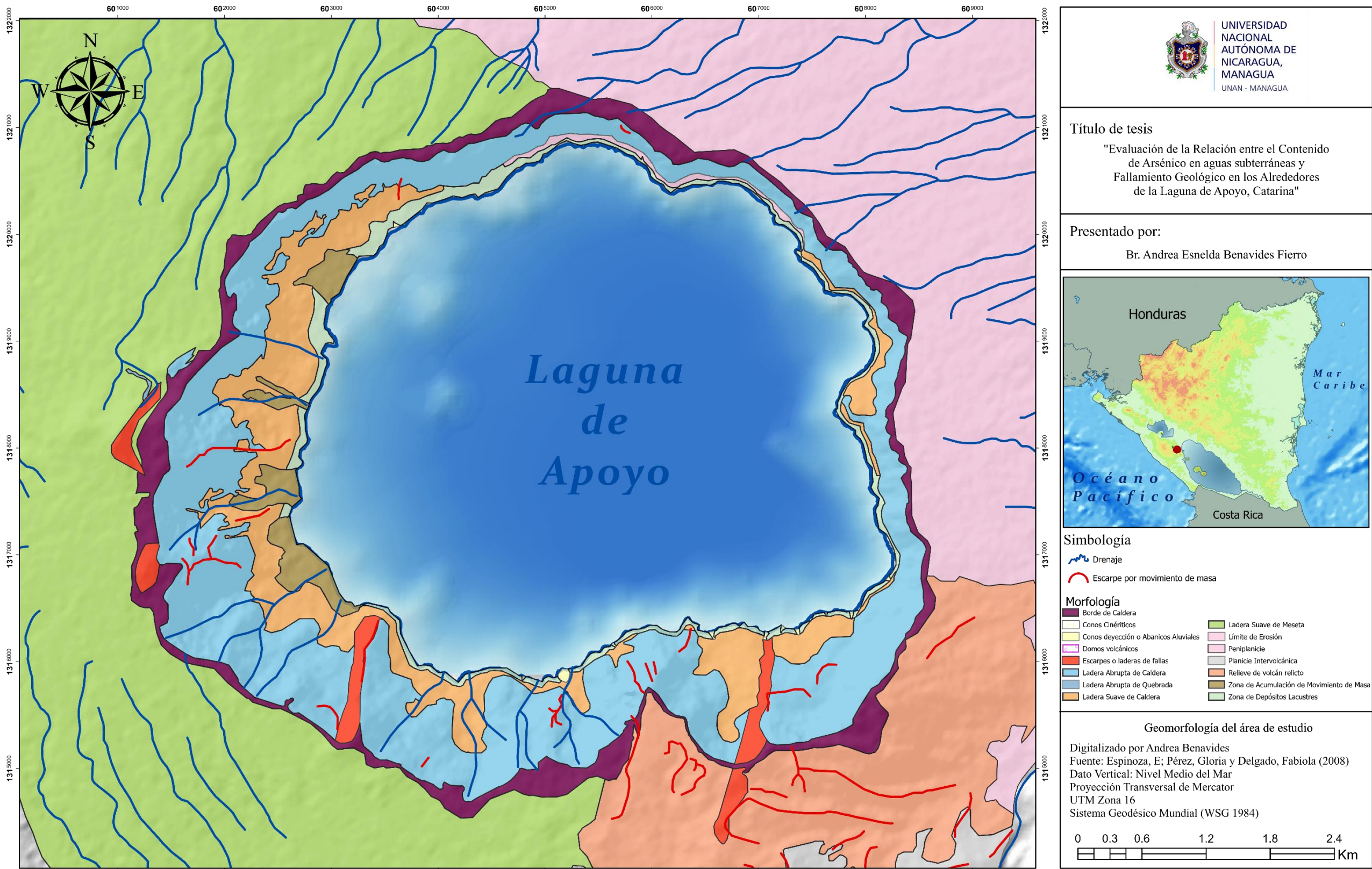


Figura 3. Mapa geomorfológico del área de estudio. Fuente: Espinoza, E; Pérez, Gloria y Delgado, Fabiola (2008)

2.2.4. Geología local de la Laguna de Apoyo

Los materiales geológicos que se encuentran aflorando se diferencian por las diferentes erupciones sucesivas del vulcanismo cuaternario la cual originó la formación de varios edificios volcánicos, y que han reportado materiales que ahora son parte de la estratigrafía de la Depresión nicaragüense. Los materiales influyentes son los de la Caldera Apoyo dentro del escarpe de la misma y fuera del escarpe los materiales provienen de la Caldera Masaya, corresponde a la unidad Tobas de Ticuantepe (QHmt), las que sobre yacen a materiales del Grupo Apoyo (Qpap) pómez y basaltos (QTapb) (Figura 4). Apoyo se diferencia con once unidades lito-estratigráficas, las cuales están constituidas por litología volcánica con diferentes características, las que son equivalentes al Complejo Volcánico Masaya. (Espinoza, E 2008).

1. Unidades más recientes

1.1. Depósitos lacustres (QHlac)

En la costa de la Laguna Apoyo se observan terrazas diferentes originadas por la sedimentación y la disminución en el nivel de agua de la Laguna, los materiales son sedimentos de laminación fina, consiste de materiales de composición arcillo-arenoso con algunos clastos re trabajados de roca. Estos depósitos tienen la peculiaridad de poseer en los sedimentos más recientes numerosas conchas blancas de gasterópodos, lo que puede indicar que hayan colonizado la Laguna en un periodo reciente. Esta unidad tiene un espesor aproximado de 15 m (evidencia que muestra hasta donde llegaba el nivel del agua tiempo atrás).

1.2. Depósitos aluviales (Qal)

Esta unidad aflora en los alrededores e interior de quebradas, estos depósitos originados por la acumulación o sedimentación de materiales arrastrados por las corrientes de forma paralela a la formación de la red de drenaje. Son depósitos compuestos de materiales limo y arcilla, el espesor varía según la zona, el tamaño de la quebrada y la micro cuenca que lo alimenta.

1.3. Depósitos coluviales (QHcl)

Aflorando en la parte baja al pie de las laderas de la Caldera Apoyo, este material proviene de las zonas de mayor pendiente, donde se produce constantemente rupturas en las rocas de pómez y lavas. Estos depósitos epiclásticos consisten de gravas y arenas dentro de una matriz areno-arcillosa, de coloración café y en otras partes de color amarillento por estar expuestos a la alteración hidrotermal.

2. Grupo Masaya

El Complejo Masaya presentó una gran actividad volcánica en el Holoceno, expulsando fuera de sus límites varias unidades de depósitos piroclásticos.

2.1. Unidad Tobas Ticuantepe

Estos depósitos provienen de una serie de explosiones tipo sub-plineanas de la Caldera Masaya, son tobas bien consolidadas de color gris claro a café con clastos de basalto y lapilli acrecional. Estos depósitos recubren la zona de Masaya, Catarina, San Juan de Oriente y parte de Diriá.

2.2. Sub-unidad Toba Meteorizada

Esta se encuentra meteorizada en su parte superior, de coloración amarillenta y semi compactada, con espesor entre 0.50 a 2 m, esta unidad sobre yace a la sub-unidad toba pisolítica.

2.3. Sub-unidad Toba Pisolítica

De coloración gris claro y textura fina, con abundantes lapilli acrecional (pisolitos), se encuentra compactada y en ocasiones esta toba se presenta con pocas fracturas con espesor entre 0.80 hasta 2 m, esta sobre yaciendo a la sub unidad arenácea.

2.4.Sub -unidad Toba arenácea

Esta sub-unidad forma secuencias con ligeras inclinaciones discordantes entre secuencias lo que evidencia un origen turbulento de deposición. Se puede observar capas finas tamaño arena.

2.5.Unidad Arcillas

Suelo fósil semi-compactado, con textura arcillosa caracterizada por presentar color rojo quemado (en contacto debajo de las Toba Ticuantepe inferior). Este material es utilizado por los pobladores de Catarina y San Juan de Oriente para la realización de cerámica.

3. Grupo Granada-Nandaime

Corresponde a un lineamiento entre Granada y Nandaime, que presenta una serie de conos cineríticos. En Apoyo existen varias capas de escoria dentro de la Formación Pómez Apoyo lo que indica un origen en el volcanismo de este lineamiento.

3.1.Unidad de escoria de Granada

En la zona exterior de la Caldera Apoyo se ubica el Cerro El Chanal, donde se puede observar depósitos volcánicos tamaño lapilli hasta tamaño bombas, en ocasiones con fragmentos vesiculares de vidrio. También se observa una transición de capas finas y gruesas con bloques de basaltos tamaño bomba dentro de una matriz de escoria fina.

4. Unidad de Brechas volcánicas

Aflora entre el municipio de San Juan de Oriente donde se puede observar una roca muy compactada con fracturas S 30° E, presenta un lente de roca basáltica masiva. En Diriá específicamente cerca de la costa en La Conquista se identifica un horizonte muy compacto donde la matriz aparece soldada, con presencia de alteración hidrotermal.

5. Grupo Apoyo

5.1.Unidad de pómez

Se asocian al colapso de la Caldera Apoyo, son depósitos bastante extensos con características físicas variables. Cada variación litológica evidencia la forma en que estos fueron depositados.

5.1.1. Pómez superior

Se trata de una pómez de caída, la cual aflora en la parte sureste y noreste de Apoyo. Su coloración es blanca, con gradación normal y presencia de líticos de composición basáltica. Es el material más reciente dentro de la secuencia, su pómez esta meteorizada y presenta un color amarillo con fragmentos de basalto en menor cantidad.

5.1.2. Pómez media

Pómez de caída, compactada, sin estratificación y con muchos líticos basálticos. En algunos afloramientos se puede observar una gradación inversa, producto de la actividad intensa y el colapso de la columna eruptiva. Es de color rosa pálido, con vesículas rellenas de astillas vítreas.

5.1.3. Pómez inferior

Este miembro está presente en varios afloramientos en el costado Noroeste y Sureste de la Caldera, es una pómez de color blanca sin estratificación y con una selección moderada. Esta pómez contiene fenocristales de plagioclasas, hiperstena, augita, magnetita y apatito como mineral traza y fragmentos de vidrio en la matriz que rodea los fenocristales.

6. Domos dacíticos

Corresponde a tres domos de composición dacítica (roca más silíceo en el área), uno se ubica cerca del borde del cráter en Diriomo llamado El Cerrito, otro llamado El Cerrito y un tercero ubicado en Veracruz. Los domos se crearon posiblemente por el resultado de un ascenso de magma ácido a través de dos fallas principales, lo que provocó erupciones fisurales secundarias

que se asocian al complejo volcánico Pre Apoyo. Estas fallas se suponen activas, ya que la falla que atraviesa el Cerro La Ardilla presenta un desplazamiento que ha afectado a materiales más jóvenes. Estos domos podrían representar la etapa final del sistema volcánico Pre Apoyo, asociada a centros eruptivos secundarios o el inicio del grupo Apoyo dada la afinidad composicional.

7. Grupo Pre-Apoyo

Aquí se agrupan todas las unidades que tienen origen ligado a los productos del Complejo Volcánico de Apoyo que se generaron antes del colapso de la caldera.

7.1.Unidad de Lavas Pre Apoyo

Esta unidad se asocia a la formación de relieves del borde del cráter, correspondientes a las laderas de uno o varios estrato-volcanes (Complejo Volcánico Pre Apoyo). De forma discordante sobre Las Sierras se tiene una serie de coladas volcánicas basálticas y andesíticas; se trata de rocas de composición máfica con edad mayor a 90,000 años (Cuaternario-Pleistoceno Medio). Los afloramientos son masivos y fracturados quizás debido a la sismicidad de la zona. Por su situación y composición se identificaron dos sub unidades, las lavas basálticas de Pre Apoyo y lavas basalto-andesíticas de Diriomo.

8. Grupo Las Sierras

Son las rocas más antiguas dentro de Apoyo, se trata de materiales piroclásticos formados a finales del Terciario e inicios del Cuaternario. Se describe como una ceniza compactada de textura fina y matriz arenosa con clastos de escoria volcánica. La roca se clasifica como una toba lítica cristalina, con presencia de muchos óxidos, plagioclasas agrupadas y corroídas, también arcilla en la matriz. Existe la ocurrencia de un cambio lateral del Grupo las Sierras de la parte Noreste y Sureste de Granada, interpretándose como un producto de un vulcanismo diferente ya que está aflorando a una distancia considerable del antiguo centro eruptivo (Espinoza, E 2008).

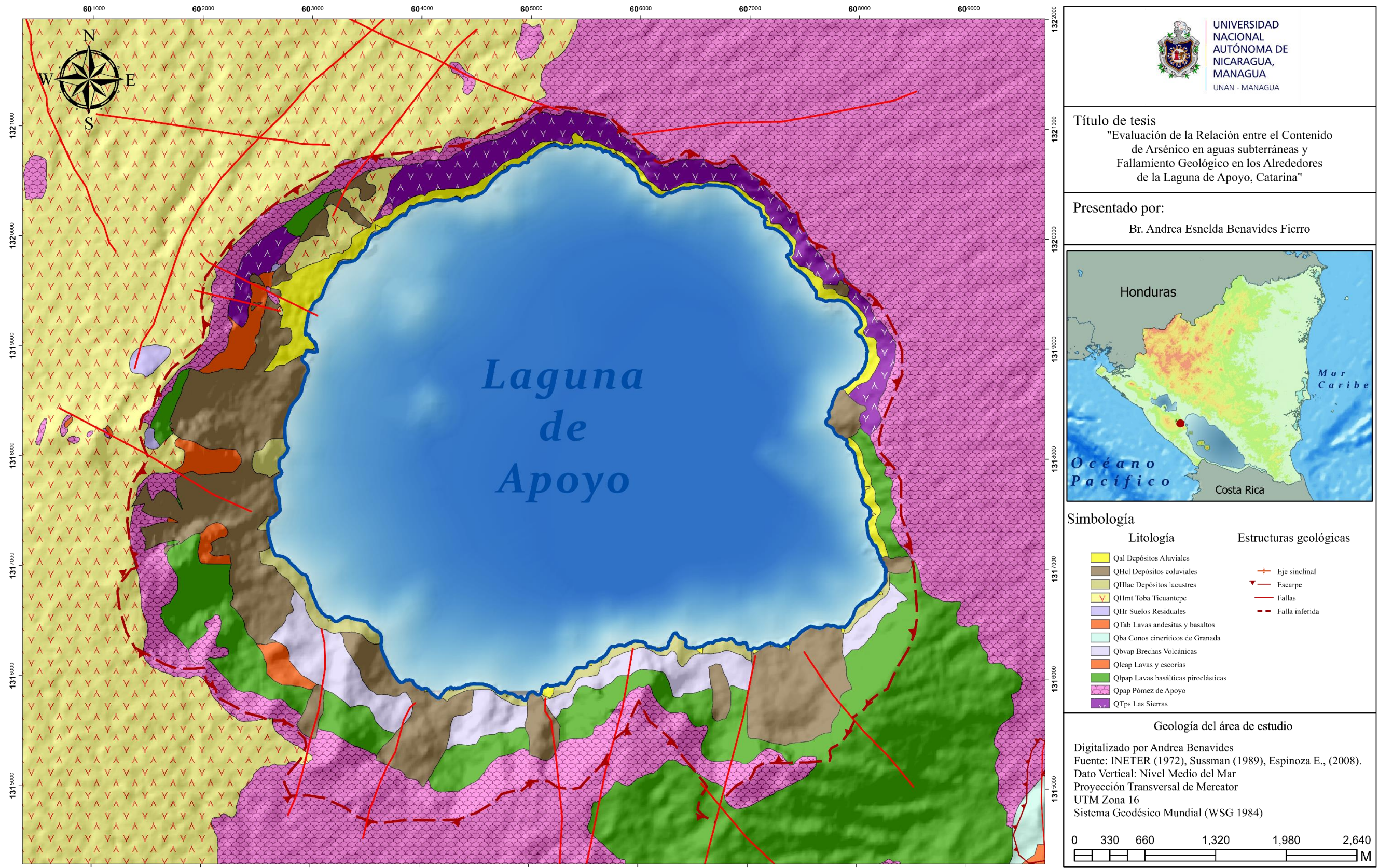


Figura 4. Mapa geológico del área de estudio. Fuente: Espinoza, E (2008)

2.2.5. Origen de la Caldera Laguna Apoyo

En la Caldera Apoyo las rocas más antiguas expuestas corresponden a depósitos piroclásticos y volcánicos de carácter explosivo con edad Plio-Pleistoceno, la cual se conoce como Grupo Las Sierras; estas rocas se encuentran cubiertas por una serie de lavas basálticas a andesíticas, las que surgieron de Apoyo en un lapso de tiempo corto lo que formó un amplio escudo (Sussman, 1985). Una migración del punto de choque entre la Placa Cocos contra el Bloque Chortis de la Placa Caribe origina movimiento de la cadena volcánica (lineamiento actual), en Apoyo se dieron emisiones basálticas por varios centros de emisión que crearon un escenario de un volcán principal Pre Apoyo de tamaño similar al Volcán Masaya (Vázquez et al., 2007).

Antes del colapso de la caldera, se produjeron lavas y escorias toleíticas altamente atípicas a lo largo de las fracturas con tendencia N-S que cortaban el edificio volcánico y la meseta piroclástica altamente erosionada hacia el Este (Sussman, 1985). Durante esta época se produjeron deslizamientos y flujos de lodo los que están presentes en las laderas de la caldera cerca de Granada. Probablemente ocurrió una diferenciación magmática y se originaron erupciones andesíticas, domos dacíticos y las posteriores erupciones evidencian que esta diferenciación alcanzó grados elevados de acidez (Vázquez et al., 2007)

Aproximadamente hace unos 23,000 años la cámara magmática alcanzó un alto grado de presión lo que provocó una erupción de unos 11 km³ de magma dacítico en forma de flujos de ceniza, caída aérea y oleada piroclástica, las cuales se hicieron en dos fases distintas lo que provocó el colapso de la caldera. La naturaleza lítica de los primeros depósitos de flujo de pómez sugiere que el colapso comenzó cerca del final de la fase eruptiva inicial. Un periodo de calma en Apoyo fue marcado por una erupción de toba con escoria proveniente de la Caldera Masaya donde se desarrolló un horizonte de suelo; en Apoyo se reanuda la actividad explosiva con una erupción de piedra pómez porfídica desde un respiradero en el piso de la Caldera Apoyo, el colapso final del edificio volcánico culmina con una erupción de lava andesítica a lo largo de fallas de los anillos casi verticales y se continuo con la efusión de lavas y escoria toleítica. Los depósitos de piedra

pómez relacionados con el colapso de la Caldera Apoyo representan la más grande erupción de magma silícico de Nicaragua durante el Período Cuaternario (Sussman, 1985).

Existen dos sistemas principales de fallamiento en la Pre caldera de Apoyo, un primer sistema que es paralelo al patrón tectónico regional de la Depresión Nicaragüense y la cadena volcánica cuaternaria, el segundo sistema es transversal a la tendencia dominante, el cual consiste en fallas rectas ligeramente arqueadas, de las cuales varias evidencian un movimiento post caldera (Sussman, 1985). La ocurrencia de sismos superficiales es un indicativo que el proceso de colapso de la caldera aún no finaliza (Vázquez et al., 2007).

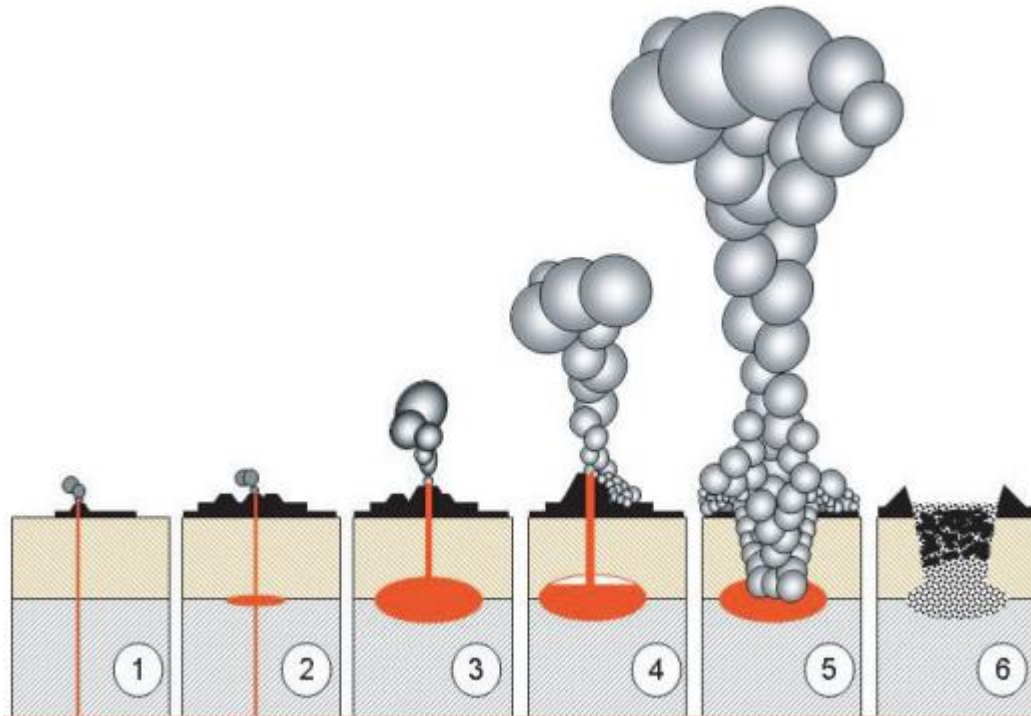


Figura 5. Proceso de formación de calderas.

5.1 Sucesión de erupciones 5.2 crecimiento y evolución magmática 5.3 sucesivas erupciones explosivas y vaciado de la cámara magmática 5.4 el peso del material, el fracturamiento y vaciado de la cámara llevan al colapso 5.5 formación de una caldera. Fuente: (Linares, Ortiz, & Mareeno, s.f.)

2.2.6. Hidrología de la Laguna de Apoyo

La cuenca hidrográfica de El Río San Juan es la más extensa de Centroamérica, con 41,638 km², se llama Cuenca del Río San Juan porque toda el agua de la cuenca drena al Río San Juan, el que a su vez drena al Mar Caribe. Esta cuenca esta compartida entre Nicaragua y Costa Rica. En Nicaragua se caracteriza por poseer cuatro subsistemas hidrográficos: Lago artificial Apanás, Lago Xolotlán, Lago Cocibolca y el Río San Juan. La zona ha sido considerada como un puente biológico entre América del Norte y América del Sur (Fundación del Río, 2009).

La Laguna de Apoyo se ubica dentro de la Cuenca Hidrográfica Río San Juan, ésta tiene su origen en el mismo proceso de formación de la Caldera dentro de la antigua estructura del Volcán Pre Apoyo, la que con el paso del tiempo se fue llenando poco a poco de agua principalmente por flujos subterráneos, ya que, el colapso fue tan profundo que cortó más de 200 metros de zona saturada de agua; también hubo aporte por la precipitación y escorrentías superficiales que fluyeron hasta el interior de la caldera y hacia fuentes hidrotermales que actualmente liberan agua cargada en sales desde la zona interna de la antigua estructura volcánica (Vázquez et al., 2007). En superficie Apoyo se considera como la laguna cratérica más grande de Nicaragua con 21 km² (Calderón Palma & Flores Meza, 2010), la cuenca superficial es de aproximadamente 38 km² limitándose a sus laderas y creando un sistema de drenaje radial. Su espejo de agua es extenso, debido a eso prevalece la evaporación sobre la alimentación superficial.

El nivel del agua de la Laguna presenta una disminución (0.24 m por año) (Parello et al., 2008). Vázquez et al., (2007) indica que hace 20 o 30 años existían 8 arroyos permanentes, sin embargo, actualmente solo hay 3; ésta pérdida se relaciona a la disminución del nivel de la Laguna. Parello et al., (2008) indica que el nivel de agua de la laguna para 1972 era de 78 m.s.n.m., para 1985 se reporta un nivel de 74.84 m.s.n.m., lo que indica una variación de 0.24 m por año. El descenso del nivel de agua se debe principalmente a causas meteorológicas naturales, ya que existe una diferencia bien marcada entre la precipitación y la evaporación en la zona; también debido a la relación de balance entrada-salida subterránea a la laguna. La Laguna de Apoyo tiene una forma casi circular con un diámetro aproximado de 6.6 km²; el área de drenaje es una sub cuenca de

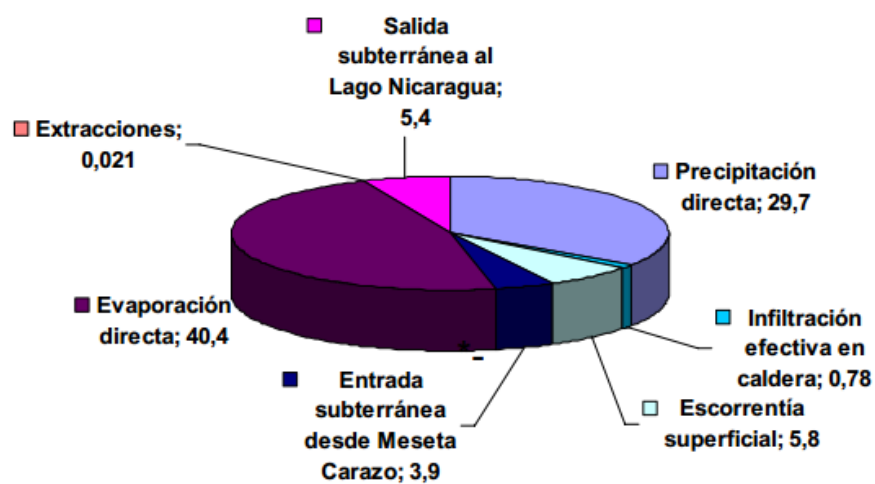
aguas con escurrimiento superficial que se ve limitado a las laderas del interior de la caldera, creando una red de drenaje radial, es una depresión cerrada la cual no tiene salida superficial y obtiene escasos aportes de quebradas en época lluviosa, así como de algunos manantiales permanentes, lo que la define como un sistema endorreico (Vázquez et al., 2007).

2.2.7. Hidrogeología de la Laguna de Apoyo

La Cuenca Laguna de Apoyo se encuentra en la Provincia hidrogeológica del Pacífico, el entorno de la Laguna es complejo ya que se encuentra entre la Caldera Las Sierras y la Caldera Masaya; con deposiciones de piroclastos y lavas, los piroclastos recientes se caracterizan por formar buenos acuíferos. Krasny & Hecht, (1998) ubican estos acuíferos en un subsistema acuífero suroeste donde se incluye la Cuenca de la Laguna de Apoyo en el Sub Sistema acuífero Granada-Tipitapa; donde se describe que la Cuenca representa una zona de recarga del acuífero de Granada, sin embargo, este forma parte del acuífero regional que recarga desde las zonas más altas de la Meseta de los Pueblos. El basamento de la Laguna es el Grupo Las Sierras, se puede ver afloramientos en la zona Noreste en las orillas; el flujo subterráneo general ocurre en dirección SO-NE.

Existen indicios que existe una zona de descarga subterránea de las aguas de la Laguna de Apoyo hacia el Lago Cocibolca en la zona Noroeste de la ciudad de Granada, evidencia de esto es el aumento de salinidad del agua. En esa zona la salida es ancha comparada a la entrada desde Carazo, así se tiene una desconexión con el acuífero principal de Las Sierras en todo el borde de la Laguna, exceptuando la franja entre San Juan de Oriente y Diriá y otra marcada zona de descarga cerca a Granada (Vázquez et al., 2007).

La aportación subterránea desde el acuífero regional se estima en $3.9 \text{ Hm}^3/\text{año}$, este valor obtenido al considerar una transmisividad media de $235.35 \text{ m}^2/\text{día}$ y un gradiente hidráulico de 0.015. Las pérdidas subterráneas desde la Laguna de Apoyo hacia el Lago Cocibolca se calculan en $5.4 \text{ Hm}^3/\text{año}$, donde se consideró una transmisividad media de $1,250 \text{ m}^2/\text{día}$, un gradiente hidráulico de 0.0044. La precipitación directa de la Laguna se estima en $29.7 \text{ Hm}^3/\text{año}$ calculado en un intervalo de tiempo desde 1986 hasta 2006; y su evaporación directa se estima en $40.4 \text{ Hm}^3/\text{año}$ (Vázquez et al., 2007). Todos estos datos arrojan por qué ha ocurrido un descenso en el nivel de agua de la Laguna, ocurre un desequilibrio en la entrada de aguas y las salidas de la misma.



Balance Hídrico de la Laguna de Apoyo (en Hm3)

Figura 6. Balance hídrico de la Laguna de Apoyo.

Fuente: Vázquez et al., 2007

2.2.8. Hidroquímica de aguas subterráneas

En base a una colección de datos de isótopos que se realizaron en la Laguna de Apoyo se determinó y clasificó químicamente dos tipos de aguas subterráneas, el resultado que corresponde a aguas de la Laguna; estas pruebas fueron analizadas en los laboratorios del CIRA (2006) y el laboratorio INGV (2006).

Con los datos recopilados se realizó un Diagrama de Piper (Figura 7) donde se refleja la diferencia química mencionada anteriormente, el primer grupo (color rojo) que se observa es tipo Ca-Mg, Ca-Na y Na-Ca, aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas; en este grupo se encuentran rangos de conductividades bajos y los pozos que pertenecen son Finca Athenas, La Zopilota, La Escuelita, pozo en Niquinohomo, Nandasmo y un manantial ubicado en Dirιά.

El segundo grupo (Figura 7, color naranja) corresponde a aguas tipo HCO_3 , CO_3 Cl, son aguas bicarbonatadas cloruradas y/o sulfatadas sódicas; aquí pertenecen los pozos de Estancia Adriana, Cuadra Richardson y Hacienda Vista Hermosa, estos pozos tienen rangos de conductividades altos (Calderón Palma & Flores Meza, 2010).

Finalmente, como referencia se tienen aguas Cl- HCO_3 -Na cloruradas y/o sulfatadas sódicas, en este caso corresponden aguas de la Laguna de Apoyo (Figura 7, color verde) las cuales tomaron en diferentes puntos, también pertenece a este grupo aguas de fuente termales.

Compilación (2008)

Diagrama de Piper

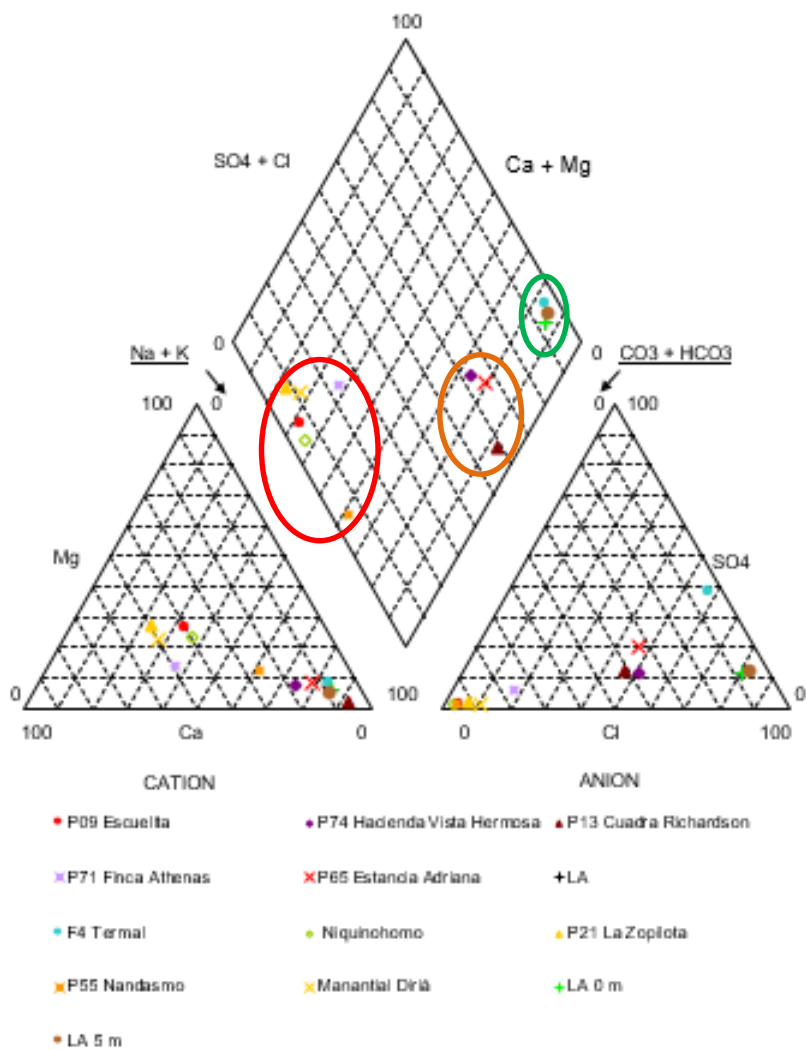


Figura 7. Diagrama de Piper.

Fuente: (Vázquez et al., 2007), (Calderón Palma & Flores Meza, 2010)

2.3. Marco conceptual

Arsénico (As): Es considerado como uno de los veinte elementos más abundantes sobre la tierra, está presente en rocas, suelo, agua y aire. El arsénico es un elemento de la de la Tabla Periódica con número atómico 33 y simbología As, pertenece al grupo de los metaloides, también llamados semimetales. Puede encontrarse en diversas formas, de las cuales en estado sólido es raramente visto.

Este elemento tiene cuatro estados de valencia en que puede existir: As^{3-} , As^0 , As^{3+} y As^{5+} . En el mar las concentraciones de arsénico normalmente son menores que $2 \mu\text{g/l}$; en las aguas superficiales y subterráneas varía entre 1 a $10 \mu\text{g/l}$. Los niveles de arsénico elevados son relatados en aguas de origen geoquímico y asociados a actividad hidrotermal, este metal no es soluble en agua. En diversos países como Argentina, Chile, China, Hungría, Estados Unidos, Japón, México, Taiwán y Vietnam se han reportado enfermedades por consumo de aguas contaminadas por arsénico; presentando síntomas diferentes como hiperqueratosis, alteraciones degenerativas en la piel (enfermedad de salitre en Chile), entre otros (Carabantes & Fernicola, 2003).

Arsénico (As) en aguas subterráneas

En general la concentración de este metal en aguas subterráneas son inferiores a $10 \mu\text{g/l}$, sin embargo, se presentan concentraciones altas las cuales no se restringen a determinadas condiciones o ámbitos y aparece elevado en acuíferos en condiciones oxidantes y de pH alto, en acuíferos con condiciones reductoras, con circulación hidrotermal o acuíferos afectados a la actividad minera o por procesos antropogénicos (Lillo, 2002). En este caso la contaminación natural por arsénico en mantos subterráneos se relaciona por la actividad volcánica y sistemas hidrotermales. El As disuelto en el agua subterránea normalmente se presenta como oxianión, cuyas especies más importantes son los arsenatos con estado de oxidación (V) y los arsenitos con estado de oxidación (III). Estas especies son solubles en un amplio rango de pH, pero en condiciones oxidantes predomina los arsenatos, en ambientes reducidos predominan los arsenitos (Espinoza Altamirano, 2005). Una peculiaridad notable de la concentración de Arsénico en aguas subterráneas de forma natural

es que no siempre hay una relación directa entre el alto contenido en el agua y un contenido de As en los materiales que conforman el acuífero, no existe un modelo geológico/hidrogeológico común para todas las ocurrencias identificadas, encontrándose así el As en situaciones muy variadas, en pocas palabras, la presencia de As en cada caso es la consecuencia de un ambiente geoquímico y unas condiciones hidrogeológicas específicas para ese caso (Lillo, 2002).

En el caso de estudio la concentración de este metal se relaciona con un sistema de fuentes hidrotermales, con pH entre 7.0 a 8.5, por encontrarse en un sitio con actividad volcánica aún activa, sin embargo, su origen también se atribuye a una mezcla entre las aguas salobres de la Laguna con acuíferos superficiales de Apoyo debido a una inversión en el gradiente hidráulico favoreciendo la intrusión de agua salobre de la laguna que se mezcla con el agua de los acuíferos superficiales de Apoyo, por la cercanía a la Laguna o por la sobre explotación de los pozos. En el municipio de Granada se encontró una zona de mezcla de aguas definida por un aumento en la conductividad eléctrica en la zona de descarga subterránea de Apoyo hacia el Lago Cocibolca, provocando una mezcla con las aguas del acuífero principal de Las Sierras. En algunas zonas de la Laguna se ha evidenciado presencia de hidrotermalismo asociado al volcanismo de Apoyo, indicando esto ser otro factor de salinidad en las aguas de la Laguna. Se establece que todos los puntos de agua cercanos a la Laguna o en la zona de salida hacia el Lago de Nicaragua que presentan alta conductividad eléctrica tienen agua de mezcla de la Laguna y, por tanto, una alta posibilidad de contener niveles de Arsénico que los hacen inservibles para consumo humano (Vázquez et al., 2007).

Efectos del arsénico en seres humanos

El arsénico es un elemento esencial para la industria, se utiliza para fabricación de insecticidas, como semi-conductores, en la preparación de láseres, entre otros; pero no se conoce un uso biológico, por el contrario, la ingesta prolongada de este elemento causa graves enfermedades al ser humano. El arsenicismo crónico se presenta con lesiones dérmicas como hiper-pigmentación,

neuropatía periférica⁵, cáncer de piel, cáncer de vejiga y pulmón, enfermedades cardiovasculares, diabetes y efectos de desarrollo. Los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por este metal son vómitos, dolor abdominal y diarrea seguido por entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares, en los casos extremos la muerte. (WHO, 2011).

Figura 8. Afectación del Arsénico



Registros por la ingesta prolongada de As en zonas Rurales de México. Fuente: FEDEMEX (2017).⁶

⁵ Los nervios periféricos llevan información hasta y desde el cerebro. También llevan señales hasta y desde la médula espinal al resto del cuerpo. La neuropatía periférica significa que estos nervios no funcionan apropiadamente. (<https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000593.htm>)

⁶ Recuperado de (FEDEMEX, 2018) <https://elperiodicodemexico.com/nota.php?id=870110>

Confiabilidad en las mediciones de As con el Digital Arsenator

Para las mediciones de As en las aguas subterráneas se utilizó un aparato digital portátil (Anexo 2), para poder realizar las pruebas in situ. Para ello se estudiaron investigaciones anteriores donde se ha aplicado equipos similares y obtener una validación del aparato.

A nivel mundial se han utilizado este tipo de equipos en países como Bangladesh, el Norte de la India, entre otros y en Nicaragua se han aplicado en dos casos muy importantes, el primero en la comunidad de Santa Rosa del Peñón donde se obtuvieron datos con concentraciones mayores a 20 $\mu\text{g/l}$, y en la zona de La Unión España y Nuevo Amanecer en Telica, León con rangos desde 8 ppb hasta 290 ppb.

Según una investigación realizada por Ongley et al., 2012 para determinar la validación del Digital Arsenator, se concluye que este equipo es efectivo para mediciones de concentraciones de As en campo, sin embargo, en términos de precisión pueden haber errores significativos en concentraciones bajas (140% con $\text{As} < 10 \mu\text{g/l}$, y un 20% para As entre 10 y 100 $\mu\text{g/l}$). Los errores pueden ser minimizados mediante calibraciones cuidadosas en campo, la diferencia máxima entre los valores medidos del Arsenator y valores del ICP fueron de 10 $\mu\text{g/l}$.

Para esta investigación se realizó una comparación de datos entre concentraciones obtenidas por el laboratorio del CIRA y de Biotecnología de la UNAN-Managua, los cuales se muestran en la Tabla 1. La máxima diferencia que se muestra es de 14 $\mu\text{g/l}$, esto porque ya el rango de concentración que se midió se encuentra en el máximo límite de lectura por el equipo Arsenator. El resto de los resultados tienen diferencias menores a 5.74 $\mu\text{g/l}$.

Tabla 1. Validación del Digital Arsenator

Equipo/medición (µg/l)	Diferencias (µg/l)		Laboratorio
ICP	Arsenator		
1.64	4	2.36	Caso de estudio (Ongley et al., 2012)
10.1	8	-2.1	
26.2	26	-0.2	
26.5	31	4.5	
31.2	36	4.8	
31.4	26	-5.4	
66.8	77	10.2	
AA	Arsenator		
6.01	5	-1.01	Resultados de Laboratorio CIRA (2019)
18.68	16	-2.68	
7.14	3	-4.14	
7.32	4	-3.32	
14.64	17	2.36	
6.26	12	5.74	
100	86	-14	Resultados de Laboratorio Biotecnología (2019)

Mecanismo de remoción de As

La remoción de As está basada principalmente en la oxidación de la forma As^{5+} , el proceso de absorción se da cuando se extrae material de una fase y se concentra en otra fase sobre su superficie sólida; hay una sustancia que se concentra en la superficie o se absorbe “absorbato”, y la etapa “absorbente”. La absorción consiste en moléculas o átomos de una fase que interpenetran de forma casi uniforme en los átomos o moléculas de otra fase, constituyendo una solución, con el cambio iónico se supone un intercambio de sustancia de ion por otra sobre una superficie del sólido (Ramírez & Torrez, 2016).

¿Cómo funciona la remoción de As?

El As en su forma As^{+3} es más difícil de remover, por ello se requiere su oxidación a As^{+5} , y su absorción por hidróxido férrico amorfo que se forma de la “coagulación”; así el As es absorbido mejor a los hidróxidos de Fe asegurando la completa oxidación del As III a As IV y así se absorbe el As V. Para ello es necesario conocer las condiciones de oxidación-reducción ya que permite mostrar la zona de remoción de As (Castillo B, 2011.).

Las condiciones del Fe en forma natural (Fe^{+2}) en el agua no es suficiente para remover el As, por ello el Fe tiene que oxidar de Fe^{+2} a Fe^{+3} permitiendo la oxidación de As^{+3} a As^{+5} y finalmente removerlo (Castillo B, 2011).

Diagramas triangulares: Se basan en la agrupación de los iones más importantes, la manera más sencilla es utilizar un triángulo para cationes y otro para aniones (Fernández, 2009).

Diagrama Piper-Hill-Langelier: Este diagrama se suele emplear para representar, comparar y relacionar un gran número de análisis y expresa con más claridad las relaciones químicas entre diversas muestras de agua. Consta de dos triángulos representando aniones y cationes y un rombo. Su propósito principal es agrupar las muestras en familias y averiguar la evolución (Fernández, 2009).

Isótopos en la naturaleza

En el agua natural se encuentran tanto el hidrógeno como el oxígeno formados por una serie de isótopos los cuales son bases para aplicaciones metodológicas de isótopos en hidrología, los elementos de carbono, nitrógeno, azufre y cloro también desempeñan un papel en la geoquímica de los recursos hídricos (IAEA, 1997). El hidrógeno (principal isótopo de masa 1 se encuentra en la hidrósfera con abundancia de 99.985% acompañado por el 0.015% del isótopo pesado o δD (Deuterio), mientras que el isótopo de $\delta^{18}\text{O}$ (Oxígeno 18) en un 0.20%. Dependiendo del origen y recorrido de las aguas, estas se ven afectadas por cambios en su composición isotópica ayudando a trazar el origen y recorrido de las aguas.

Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y δD

Las aplicaciones isotópicas dependen naturalmente del carácter específico de los isótopos

- 1) Se usan isótopos estables y radioactivos como trazadores, para detectar un cuerpo de agua o cierta cantidad de agua
- 2) fraccionamiento isotópico, tránsito de compuestos como H_2O y CO_2 de una fase a otra, el cociente varía.

El fraccionamiento isotópico es un fenómeno de cambio de un determinado elemento de un estado físico o composición química a otro, donde se incluyen tres procesos específicos: termodinámica, cinética y transporte. En el ciclo hidrológico la variación de los isótopos resulta del fraccionamiento del mismo que dependen de la masa (Gat, G, & A.J, 2002).

El agua de lluvia es una de las fuentes principales de aguas subterráneas y la variación espacial y temporal del contenido isotópico se utiliza para el estudio de zonas de recarga de acuíferos. La composición del agua de lluvia se ve influenciada por los factores como: la temperatura a la cual se evaporó el agua de mar y la temperatura de condensación, la altitud como en zonas de barlovento los contenidos de Deuterio y Oxígeno 18 en lluvia disminuyen al aumentar la altitud, la latitud donde los contenidos de Deuterio y Oxígeno 18 disminuyen conforme aumenta la latitud, la cantidad donde las lluvias más abundantes son más ligeras debido a que conforme condensa la humedad residual se hace ligera y es previamente empobrecida en isótopos, la variación estacional de invierno y verano hace también que la temperatura de evaporación y condensación sea diferente. y finalmente la continentalidad donde los contenidos de Deuterio y Oxígeno 18. Disminuyen tierra dentro desde la costa, debido a que las masas de vapor son progresivamente más ligeras dentro de la tierra por pérdida de humedad y de isótopos (Soler, A.; Otero, N; Rosell, M.; Carrey, R.; Domènech, 2015).

Todos los factores que controlan la composición del agua de lluvia se ven controlados en realidad por dos grandes factores como es la temperatura y el desgaste cinético. Las variaciones de oxígeno y deuterio son covariantes ya que ambos isótopos están asociados a la misma molécula (Soler, A.; Otero, N; Rosell, M.; Carrey, R.; Domènech, 2015).

Esta relación puede verse modificada por procesos diferentes, indicando puntos representativos de la composición isotópica y en base a la posición de los nuevos puntos con la línea meteorológica local se conoce cuál ha sido el proceso modificador.

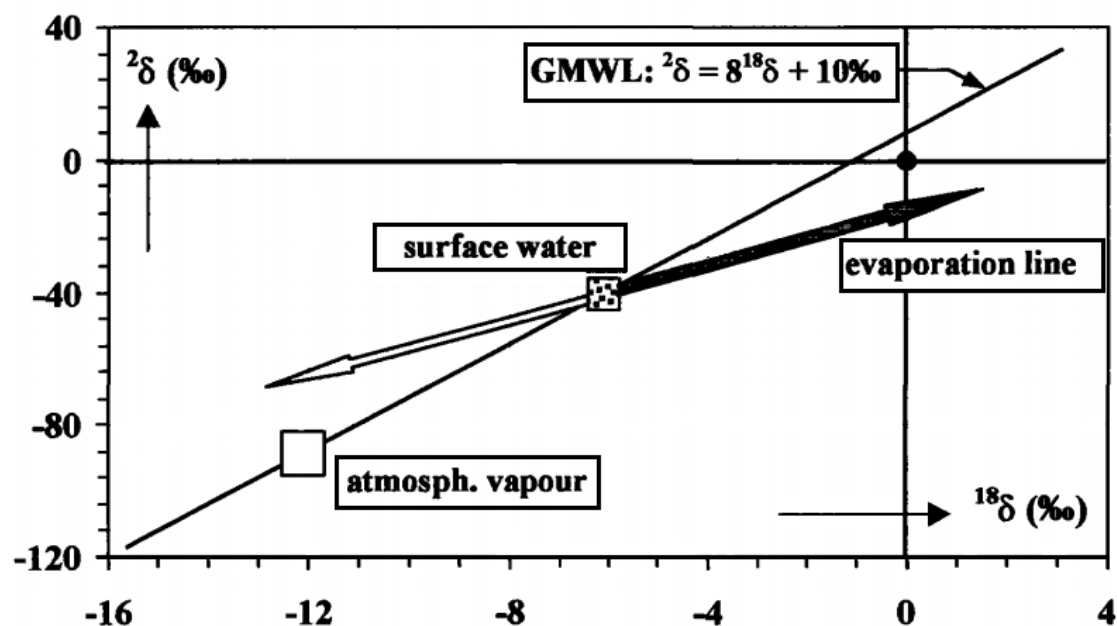


Figura 9. Relación entre $^{18}\delta$ y $^2\delta$ Fuente: (McDonnell & Kendall, 1992).

2.4. Hipótesis de investigación

Existe una relación hidrogeológica entre el fallamiento geológico local y la presencia de Arsénico en los pozos de agua subterránea.

Preguntas directrices

- ✓ ¿Qué relación existe entre las fallas geológicas en la Laguna de Apoyo y la presencia de arsénico (As) en aguas subterráneas?
- ✓ ¿Qué tipo de fallas se encuentran en el sitio, cómo se caracterizan, cuál es su orientación?
- ✓ ¿En qué zonas de la Laguna los pozos presentan mayor contaminación por arsénico (As)?
- ✓ ¿Qué medidas se pueden recomendar para reducir la concentración de As en las aguas provenientes de pozos?
- ✓ ¿Por qué las concentraciones de As son más elevadas en unos pozos, y en otros no, tiene relación la geología con esto?

Capítulo III

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Tipo de estudio

Esta investigación es tipo descriptiva, ya que se trata de identificar el fenómeno que ocurren con las diferentes concentraciones de As en las aguas subterráneas, donde con la recopilación de datos y el análisis de los mismo se generaron resultados finales.

También se trata de en estudio tipo explicativo, a partir de los datos recopilados en campo y los resultados obtenidos se trata de explicar el fenómeno de altas y bajas concentraciones de As.

3.1.2. Área de estudio

La Laguna de Apoyo se localiza dentro de la Provincia geológica de la Depresión de Nicaragua, entre el Complejo Masaya y el Volcán Mombacho; comprendida entre el Departamento de Masaya con los municipios de Catarina, Masaya y San Juan de Oriente, y el Departamento de Granada con los municipios de Diriá, Diriomo y Granada (Figura 10). La zona que rodea la caldera esta densamente poblada, aproximadamente unas 200,000 personas (Vázquez et al., 2007).

En la cuenca se encuentran laderas abruptas boscosas, aquí se encuentra uno de los más grandes y últimos parches de bosque tropical seco remanente en Nicaragua; ya que casi todo su ecosistema ha sido intervenido por el hombre (CLUSA & FUNDECI/GAIA, 2009). El clima de la zona es tropical, con temperaturas que varían entre los 20° C y 35° C, los factores climáticos que influyen directamente en los recursos superficiales y subterráneas de la laguna son las precipitaciones y la evaporación. En esta zona hay dos periodos con tasas de precipitación diferente, durante el periodo lluvioso con su máxima precipitación en los meses de junio y octubre y la evaporación es más constante y el periodo seco, la evapotranspiración potencial registrada en entre 1,600 y 2,000 mm anuales, y una humedad relativa entre 70-80% (Vázquez et al., 2007).

El sitio de estudio tiene un área aproximada de 1.5 km², en la zona Norte y Noroeste del Plan de la Laguna de Apoyo.

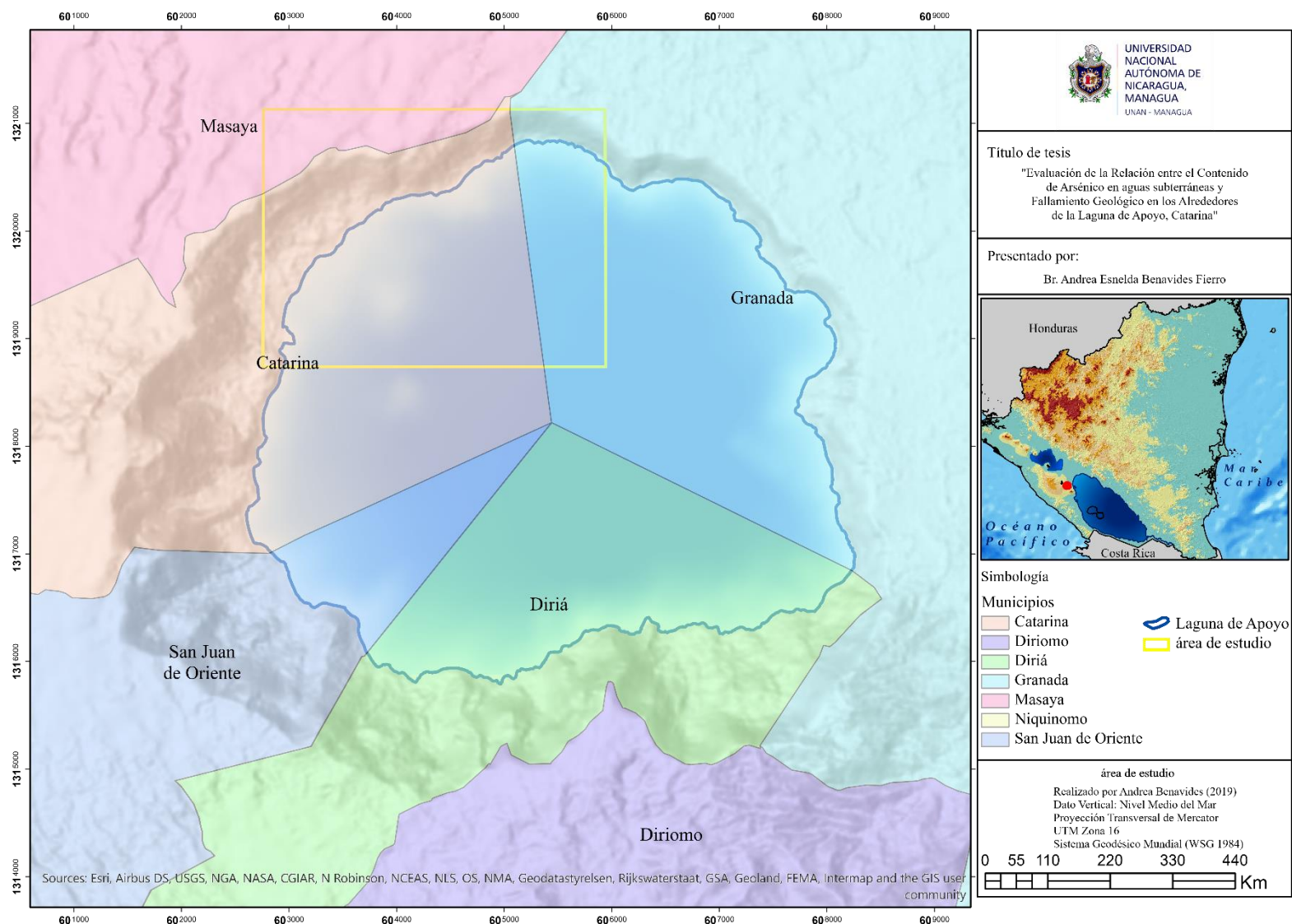


Figura 10. Área de estudio.

3.1.3 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos e información

La información se obtuvo de diferentes fuentes, en el Centro de Documentación del IGG CIGEO se obtuvieron libros, algunos artículos fueron obtenidos de páginas web, otros datos espaciales que fueron obtenidos de docentes, la información recopilada entre 1972 y 2010. Para la gestión bibliográfica se usó el programa Mendeley con el objetivo de organizar y hacer más sencilla la forma de referencia. Otro programa que se utilizó fue Atlas.Ti, este funciona como un administrador cualitativo de datos que permite guardar citas, fragmentos de textos o cualquier otro archivo para una fácil ubicación de la cita de la cual se quiere hacer. Los datos recopilados se resumen en la Tabla 5. Se obtuvo información de 14 fotos aéreas del año 2004 con escala 1:40,000 correspondientes a las hojas topográficas Masaya 2853-I y Granada 3051-IV, se estudiaron 6 ortofotomapas escala 1: 10,000 del año 1996 (E. Espinoza, 2008).

3.1.3. Procedimiento para la recolección de datos e información

- Foto-interpretación

Se realizó interpretación de fotografías aéreas por el método de estereoscopia, los parámetros a medir son el patrón de drenaje y la inferencia de fallas y/o lineamientos; la interpretación de estas se proyectó sobre las hojas topográficas Masaya y Granada. Las fotos aéreas corresponden a las Líneas de vuelo 8 y 9, del año 2004 a escala 1: 40,000. Así mismo se analizaron 8 ortofotomapas del área de estudio escala 1:10,000 del año 1996.

- Parámetros físico-químicos de los pozos

Para tomar datos de nivel de agua y profundidad de cada pozo se utilizó una sonda de nivel de agua, este tiene una capacidad máxima de 300 m. También se utilizó un multi-paramétrico marca Milwaukee con el cual se midieron datos de pH con rango entre 0-14, conductividad eléctrica con rango entre 0- 20.00 μ S/cm, sólidos totales disueltos con rango entre 0-10.00 ppt y temperatura con rango entre 0- 50°C. Para la medición de las concentraciones de As en el agua subterránea de los pozos se utilizó un equipo portátil con el que se hicieron mediciones in situ, Analizador Digital de Arsénico marca Palintest el cual tiene una sensibilidad de 2 a 100 ppb o μ g/l, a este equipo se le hicieron constantes calibraciones con soluciones obtenidas del Laboratorio de Biotecnología y el Laboratorio CIRA, ambos de la UNAN-Managua.

- Inventario de pozos

Para el inventario de pozos se utilizó la aplicación Survey 123 de ArcGIS para el inventario de pozos, previamente se diseñó una encuesta donde se incluyeron los datos de los pozos como: Dueño o propietario, fecha y hora, coordenadas, municipio, número de pozo, tipo de pozo (perforado o excavado), luego venían datos de parámetros físico químicos concentración de As, conduc-

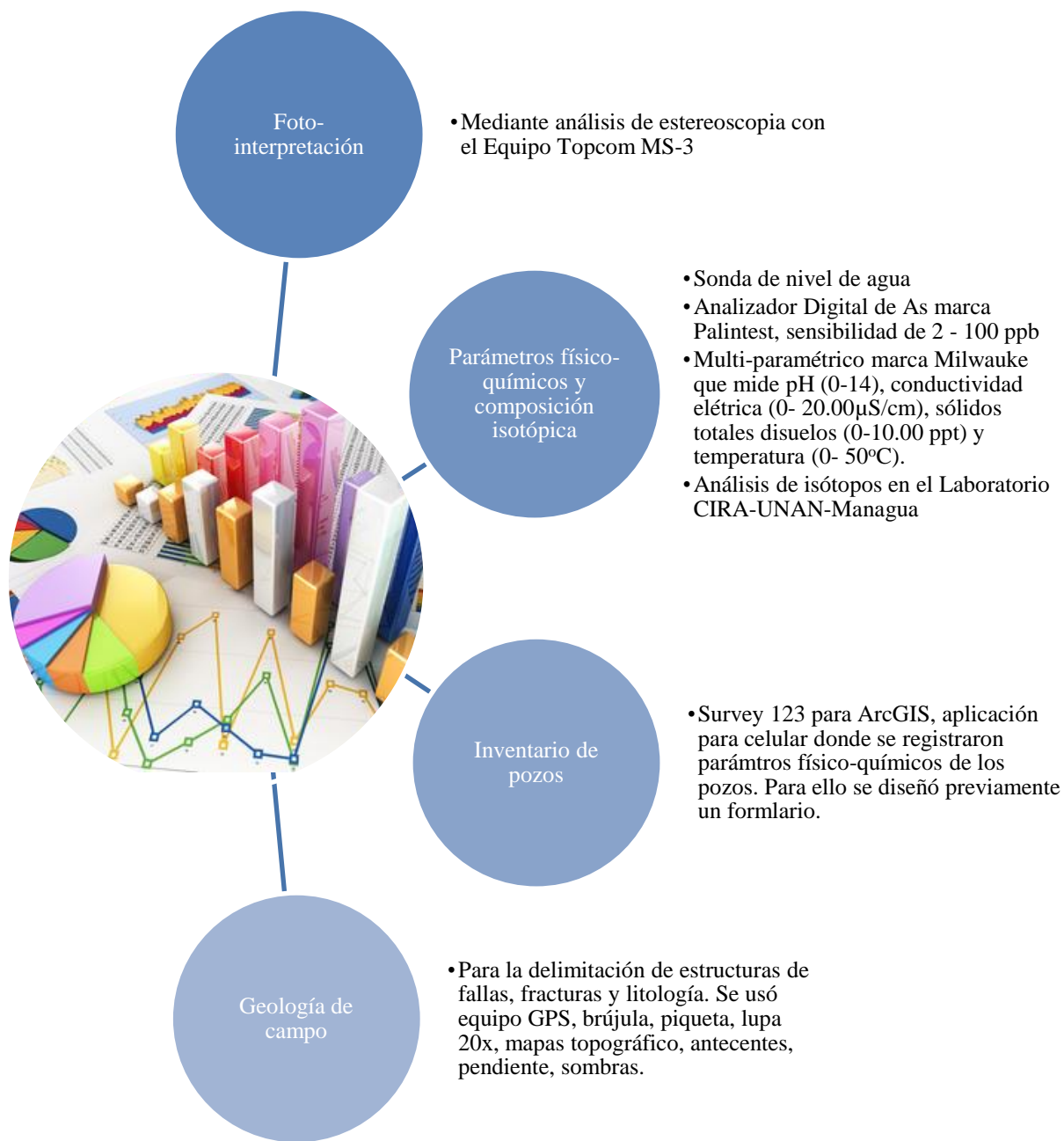
tividad eléctrica, sólidos disueltos, pH, temperatura, nivel del agua y profundidad, luego se colocaba un tipo de encuesta que incluía datos de uso del agua subterránea, fuentes de contaminación, observaciones, y finalmente fotos de cada pozo.

- Composición isotópica

Se tomaron 9 muestras durante la etapa de inventario de pozos, entre ellas 2 muestras corresponden a aguas naturales superficiales de la Laguna de Apoyo, 4 pozos con concentraciones de As mayores a 10 µg/l y 3 muestras a pozos con rangos menos a 10 µg/l. Los análisis se realizaron en el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos (CIRA-UNAN-Managua). Este laboratorio utiliza el Método de Adsorción Láser Integrated Cavity Out Spectroscopy (OA-ICOS).

- Geología de campo

Esta etapa de campo consistió en la comprobación de fallas marcadas en la etapa de fotointerpretación, también delimitación de la geología presente en el área de estudio. Durante esta etapa se pudieron obtener datos de la litología del área de estudio, se tomaron datos de rumbos e inclinación de las fracturas que fueron encontradas, así mismo se tomó información de fenómenos de movimiento de masa que ocurrieron durante esta etapa.



3.1.4. Plan de análisis y procesamiento de datos e información

3.1.4.1.SIG

- Foto-interpretación

Se realizó foto-interpretación del tipo de red de drenaje, para luego asociarlo a la interpretación de estructuras de fallas y obtener un criterio de algún lineamiento o falla. Luego se realizó la digitalización de los resultados en el Software ArcGIS 10.5, y se compararon resultados con los antecedentes del sitio.

- Datos de campo

Los datos de inventario de pozos fueron enviados de la aplicación Survey 123 a una nube de ArcGIS para su visualización en un mapa y analizar los datos de cada pozo. Para el levantamiento de los datos se realizó un previo formulario donde se recopiló la información. También se incluyeron en este software los datos recopilados en geología de campo, todos los sitios visitados y los diferentes datos que fueron encontrados. Los mapas se realizaron con el software ArcGIS Pro versión 2.4.2.

Capítulo IV

4.1. Análisis y discusión de resultados

4.1.1. Fotointerpretación

De la interpretación de los datos mencionados en la metodología se obtuvieron los datos del tipo de sistema de drenaje y fallas geológicas.

En el interior de la Caldera el drenaje es tipo radial, este se caracteriza por la morfología de la caldera (Zuidam, 1985) donde el agua proviene de las partes más altas hasta llegar a la Laguna. En las zonas Norte, Noroeste, Noreste y Sureste de la caldera el tipo de drenaje que se presenta es tipo dendrítico (Figura 11)., mientras que en la parte Suroeste el tipo de drenaje es del tipo paralelo; estos tipos de redes corresponden a una clasificación por erosión según Zuidam, (1985). Algunas redes de drenaje obedecen a las fallas interpretadas, por lo tanto, este fue de apoyo también para la interpretación de estructuras.

Para la interpretación de estructuras de fallas se encontraron dos sistemas, el primer sistema con orientación Noroeste y Sureste, corresponde a fallas tectónicas originadas por la zona de subducción de las Placas Coco y Caribe; en la Figura 16 se muestra el Diagrama de Rosas donde el eje principal tiene orientación NO- SE y su eje de extensión tiene una orientación SO, este sistema de fallas es el más antiguo. El segundo sistema corresponde a fallas volcano-tectónicas con dirección Noreste y Suroeste, datos que coinciden con el Diagrama de Rosas Figura 16 donde el eje principal tiene dirección NE y SO.

En la Figura 4 se muestran los resultados de la foto-interpretación realizada, para esto se utilizaron datos mencionados en la metodología; además de esto se tomaron en cuenta datos de antecedentes del mapa geológico de INETER (1972) Sussman, (1985) y Espinoza, E (2008).

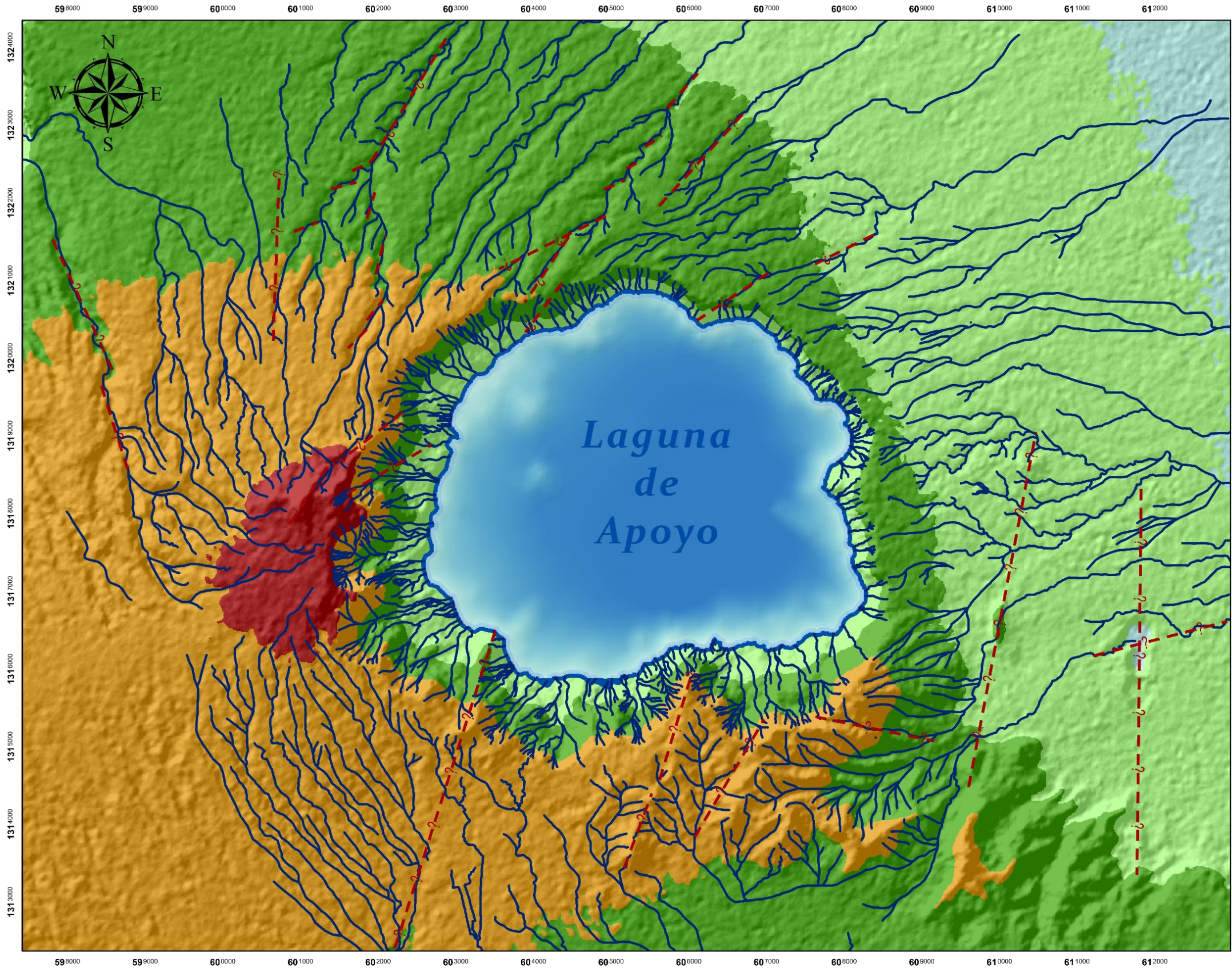


Figura 11. Resultados de foto-interpretación

UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA

UNAN - MANAGUA

Título de tesis

"Evaluación de la Relación entre el Contenido de Arsénico en Aguas Subterráneas y Fallamiento Geológico en los Alrededores de la Laguna de Apoyo, Catarina"

Presentado por:

Br. Andrea Esnelda Benavides Fierro

Simbología

MED Apoyo

- ≤ 77.741176
- ≤ 185.941176
- ≤ 332.329412
- ≤ 497.811765
- ≤ 695.117647
- ≤ 1618

— Fallas geológicas

— Red de drenaje

Resultados de Foto-interpretación

Realizado por Andrea Benavides

Fotos aéreas, línea de vuelo 8 y 9

Base Mapa de sombras y MED 12.5

Dato Vertical: Nivel Medio del Mar

Proyección Transversal de Mercator

UTM Zona 16

Sistema Geodésico Mundial (WSG 1984)

0 135,600 271,200 406,800 542,400

M

4.1.2. Estratigrafía del área de estudio

En el área de estudio se pudieron distinguir materiales volcánicos como tobas, pómez, depósitos de escorias y sedimentos holocenos.

En toda la zona Norte y Noroeste de la Laguna de tienen depósitos aluviales que van desde 2.7 m has 5 m de espesor, se pudo observar en las coordenadas 1320812, 605366 y 1320829, 605339 material de ceniza en las orillas de la laguna.

También se tiene material coluvial, los cuales corresponden a los movimientos de masa ocurridos en la zona, tanto eventos pasados como actuales registrados en la etapa de campo; este material compuesto por suelos recientes, material orgánico, y también material de los depósitos en las zonas altas como pómez y rodados (Figura 14).

En la parte alta de la caldera se tienen depósitos de ceniza y arena intercalados, con presencia de lapilli acrecional de tamaños variados; el espesor aproximado es de 1.75 m (Figura 13). Luego se tiene un gran depósito de pómez, esta se presenta de color blanco con vidrios, tiene un espesor aproximado de 49 m. En la parte superior del depósito en las coordenadas 1320715, 603338 se observa un desplazamiento de los clastos de pómez, una falla normal con rumbo de 290° y una inclinación de 40° (Figura 12).

Siguiendo la columna (Figura 15) se tienen depósitos de escoria con intercalaciones de arena y ceniza poco compactas de 0.30 m de espesor; por último, se tienen aproximadamente 40 m de toba compactada con grandes clastos angulosos de basalto, escoria y fragmentos de pómez, en algunos afloramientos se observan fracturas en múltiples direcciones (Figura 17), mucho de este material se encuentra desprendido.



Figura 12. Falla normal desplazando estrato de pómez.

Ubicación 1320715, 603338. Tiene una dirección 290° y una inclinación de 70°. Desplazamiento de depósitos de pómez de clastos de tamaño mediano angulosos.

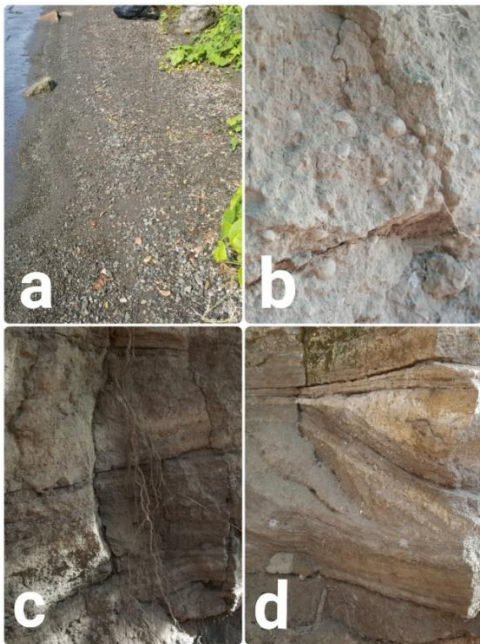


Figura 13. Litología del área.

13^a. Depósitos aluviales, 13^b. ceniza con presencia de lapilli acrecional, 13^c y ^d. depósitos de ceniza.

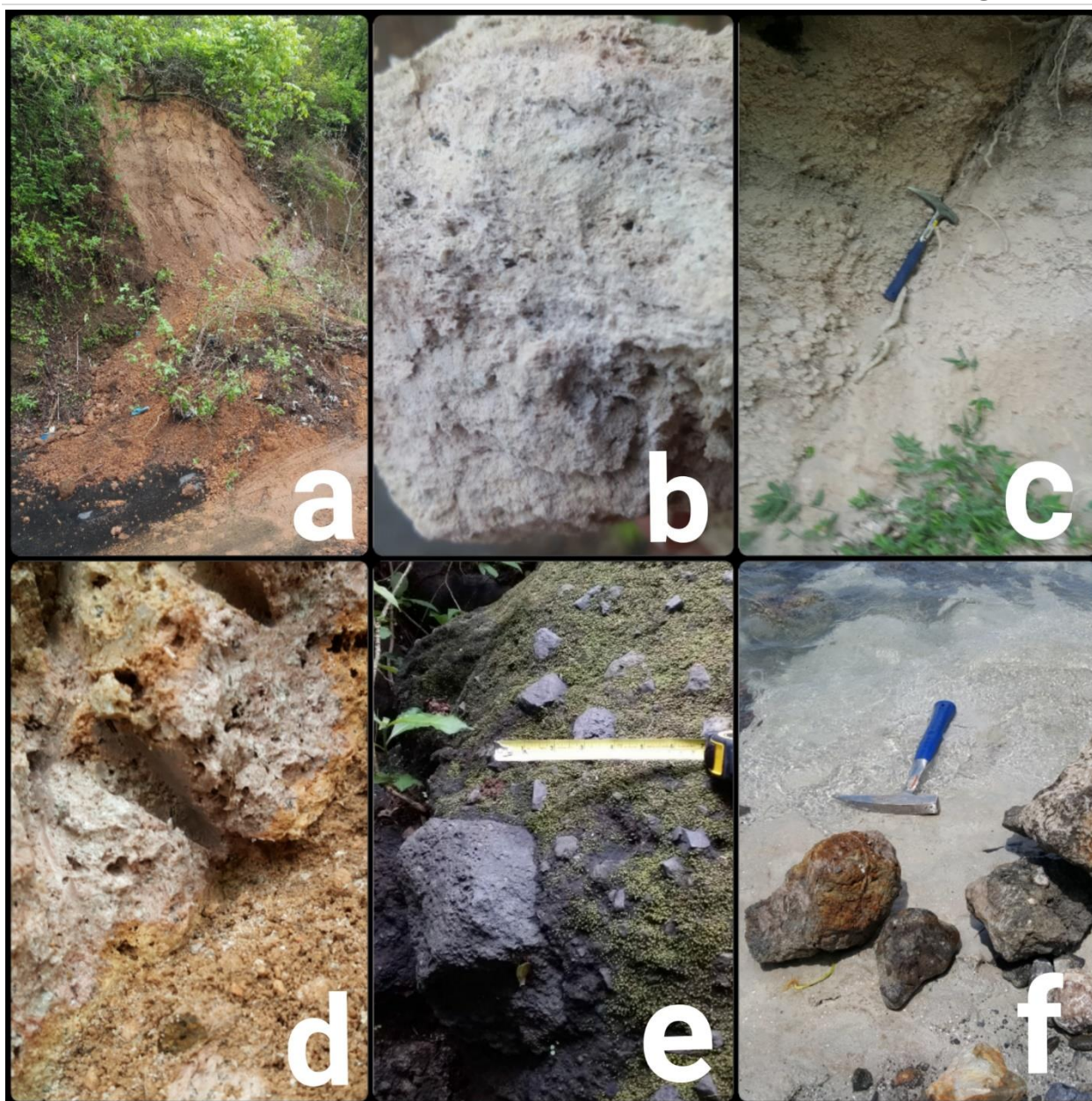


Figura 14. Litología del área.

14^a depósitos coluviales, 14^b clasto de pómez con líticos 14^c depósito de pómez 14^d pómez con alteración de color rosa, 14^e bloque de toba con clastos de basalto de 5 cm de diámetro, 14^f depósito de ceniza a orillas de playa.

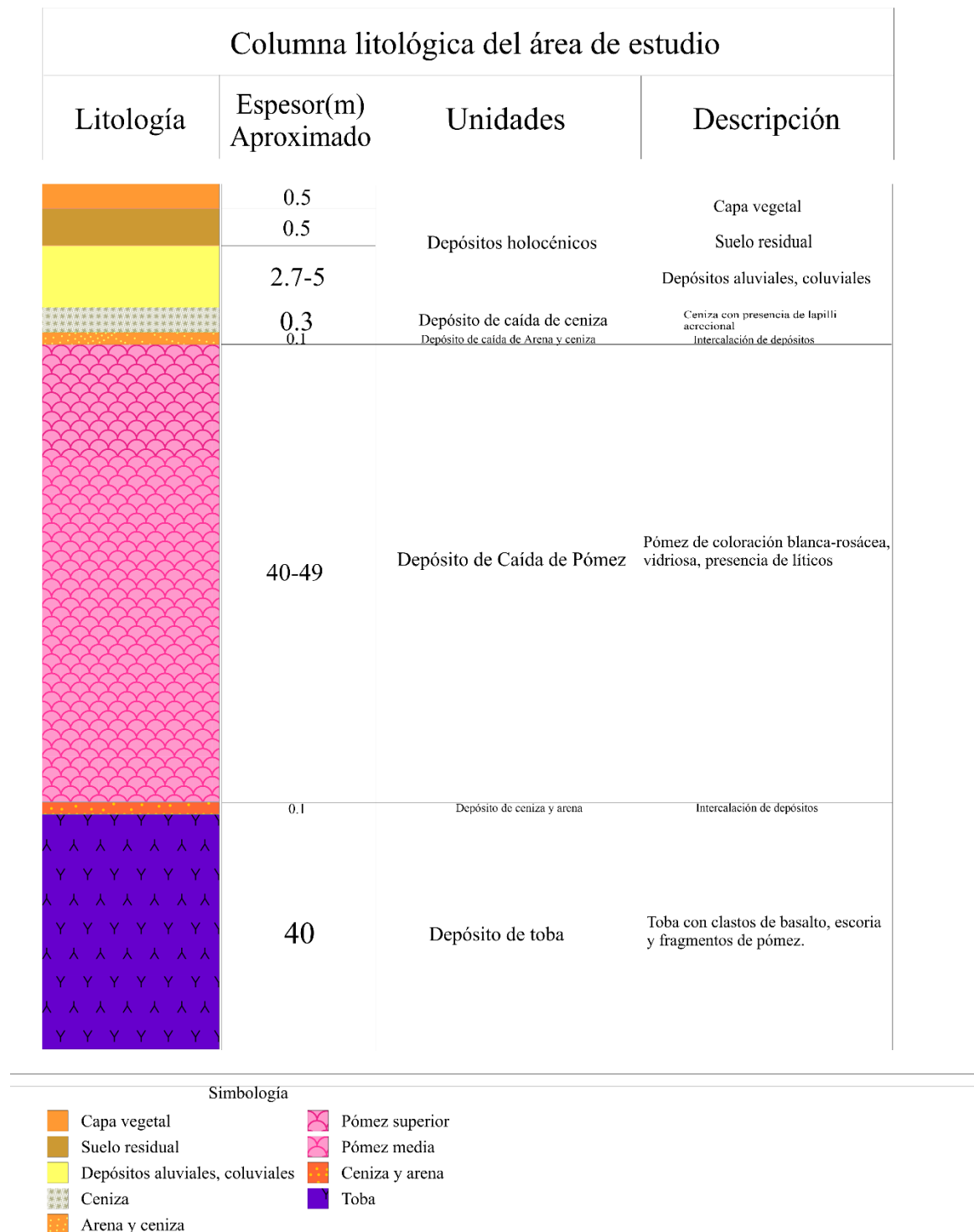


Figura 15. Columna litológica del área de estudio

4.1.3. Geología-estructural

Esta fase consistió en identificar las estructuras de fallas que fueron analizadas en la etapa de foto-interpretación, sin embargo, durante toda esta etapa se estaba en época lluviosa, lo que con la morfología del terreno desencadenó sucesos naturales como derrumbes, deslizamientos y abundante vegetación; haciendo difícil una observación directa de indicadores cinemáticos de fallas. Por lo que para su comprobación se levantaron indicadores secundarios como la secuencia de los deslizamientos, direcciones de fracturas, cambio de dirección de cauces naturales y estructuras de escarpes.

En el área de estudio se determinó una zona de debilidad con fracturas tipo conjugadas, paralelas y complejas (Figura 17). Estas presentan direcciones de principales N 10° E, S 10° O y N 15° O, este sistema de fracturas se puede asociar a esfuerzos tensionales en los depósitos, lo que puede ser generado por el movimiento de falla en el terreno. Las fracturas asociadas están en función de una falla, lo que podría indicar un sistema de falla normal, mismo sistema que se asocia a colapsos o formaciones de calderas (Cole, Milner, & Spinks, 2005).

En la Figura 16 se observa el Diagrama de Rosas que corresponde a las fracturas tomadas en el área de estudio, donde se observa un mayor esfuerzo en dirección N 20° E, datos que siguen la orientación de la falla.

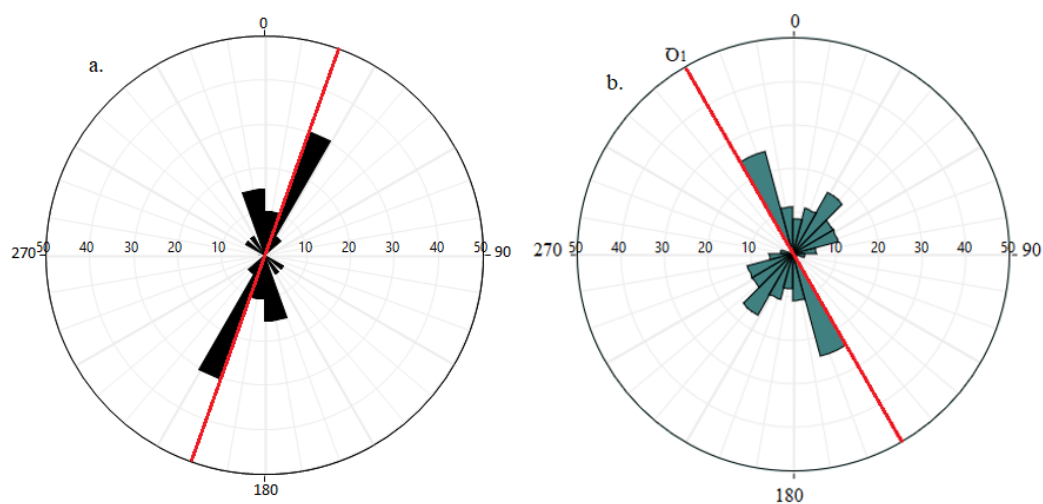
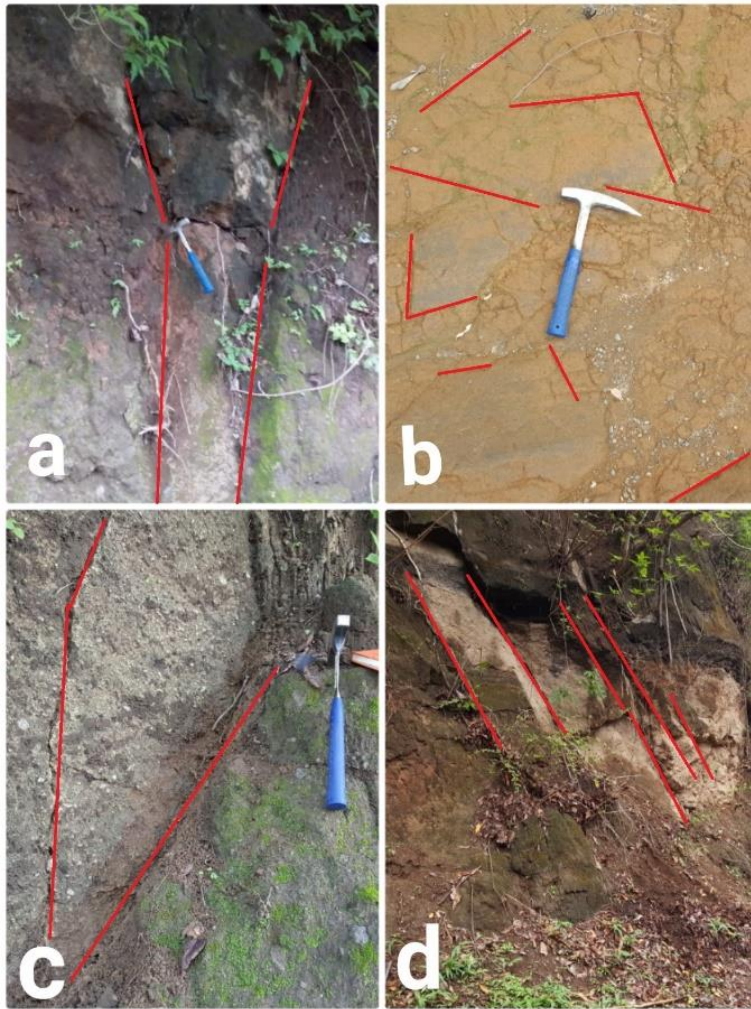


Figura 16. Diagramas de Rosas.

16^a. Diagrama de rosas correspondiente a fracturas tomadas en campo. 16^b. Diagrama de Rosas para el análisis de fotointerpretación.



*Figura 17. Fracturas encontradas en el área de estudio.
Entre las coordenadas 1319687, 602600 y 1320788, 605819*

Se realizó un levantamiento de los deslizamientos de terreno y desprendimientos de bloques que ocurrieron durante la etapa de campo; se determinó un sitio donde estos eventos ocurren a menudo lo que es provocado por saturación del suelo el época de invierno, sin embargo, también se atribuyen estos fenómenos a una falla presente la cual fue interpretada en foto interpretación, donde la ocurren fenómenos de deslizamiento, desprendimiento de bloques de toba, el sitio también como se mencionaba en la sección geo-estructural sistemas de fracturas conjugadas y paralelas.

Los deslizamientos que ocurren en la zona Norte y Noroeste son típicamente movimientos rotacionales (Figura 18), en ellos se tiene material coluvial de suelo reciente, ramas, algunos también contienen bloques de moderado tamaño (Figura 18). En el sitio también se pudo observar desprendimientos de grandes bloques de aproximadamente 0.1 m de diámetro (Figura 18), los cuales corresponden a tobas con clastos de pómez y escoria.

En toda la zona se registraron por lo menos 17 procesos de inestabilidad de materia entre deslizamientos y desprendimiento de grandes bloques, éstos fenómenos se ven afectando a quintas que se encuentran en las zonas más bajas de la Laguna de Apoyo, según el informe realizado por (COSUDE, 2005) se tiene una amenaza media y baja; como ejemplo se tiene la zona donde se infiere una falla donde ocurren varios desprendimientos y deslizamientos de terreno, se ve afectado un sitio turístico **Posada Ecológica La Abuela**, donde han ocurrido un sinnúmero de estos fenómenos. En la parte superior se construyó un muro para aminorar los daños que se causan por estos desprendimientos, sin embargo, la amenaza aún se ve presente.



Figura 18. Movimientos de masa.

18^a deslizamiento aun no ocurrido coordenadas 1319761, 602697, 18^b zoom del movimiento aun no ocurrido, con una abertura de 5 cm y alrededor de 10 m de longitud. 18^c desprendimiento de bloque. 18^d remoción de masa con una altura aproximada de 10 m y ancho de 6 m. 18^e Desprendimiento de bloques de aproximadamente 0.1 m de diámetro.

4.1.4. Inventario de Pozos

Se hizo un levantamiento total de 23 pozos Figura 19 entre los municipios de Catarina y Granada, las profundidades varían entre 4.13 m el pozo más somero y 42.7 m el pozo más profundo; los pozos en su mayoría pertenecen a quintas, otros pozos están en sitios turísticos y lugares públicos, todos los datos fueron recopilados durante la etapa de verano, a excepción del último pozo (Bladimir Rosales) donde se tomaron datos cuando ya había iniciado la etapa lluviosa en la zona.

En la Tabla 2 se muestran los parámetros físico-químicos que fueron determinados in situ en los 23 pozos y todos se encuentran dentro del Plan de la Laguna de Apoyo, en la columna de As se tiene un registro de 10 pozos los cuales presentan una concentración de arsénico mayor a los 10 $\mu\text{g/l}$ (resaltados en rojo), el más alto registrado con 70 $\mu\text{g/l}$ que corresponde al último pozo registrado como Bladimir Rosales; este se encuentra a una distancia de 18 m de la laguna. La mayoría de los pozos analizados son excavados, excepto por el pozo que pertenece a la alcaldía local; según los parámetros físico-químicos que se tomaron en campo los pozos pueden dividirse en dos áreas, unos con altas concentraciones de As, con alta conductividad eléctrica entre 450 y 1160 $\mu\text{S/cm}$ y pH mayor entre 7.4 y 8.3; y los pozos se encuentran a profundidades mayores de 10 m, a excepción del pozo Bladimir Rosales el cual está relativamente somero (4.13 m).

La segunda área corresponde a los pozos con registros de As menores a 5 $\mu\text{g/l}$, donde las conductividades eléctricas varían entre 320 y 430 $\mu\text{S/cm}$, el pH no hace mucha diferencia en cuanto a la primera área, con datos entre 7.3 y 8.3; los pozos más someros van desde 4.8 m hasta 42.7 m (pozo con mayor profundidad registrado).

Tabla 2. Inventario de pozos.

Día	Fecha	Coordenadas						Parámetros							
1	30/4/19														
Nº Pozo 0		Nombre del pozo	Municipio	Localidad	Y	X	Z	Tipo	As (µg/l)	CE (µS/cm)	STD (ppt)	T (°C)	pH	NEA (m)	Z (m)
		Laguna de Apoyo	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1319359	603598	66	AS	100	5280	2.64	26.4	8.01		
1		Casa Ma- rimba	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1320086	603659	72	PE	0	380	0.19	28.1	8.32	5.8	12
2		Público junto a Marimba	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1320077	603625	71	PE	0	580	0.29	30.9	7.63	5.92	6.47
3		Mini Mi- chel	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1320066	603545	85	PE	0	350	0.17	29.5	7.3	13.91	16
4		Helga Solano	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1320043	603496	83	PE	0	360	0.18	29.2	7.42	16.53	17.6 9
5		Pozo Al- caldía	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1319643	603018	92	PP	0	320	0.16	30.4	7.37	12.28	42.7
6		Quinta Lee	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1320495	604569	76	PE	62	520	0.26	32.3	7.99	13.77	20
2	8/5/19														
7		Estación Richard- son	Granada	Plan de la La- guna de Apoyo	1320791	605816	74	PE	27	1150	0.57	29.9	7.75	17.3	22
8		Villa Se- rena	Granada	Plan de la La- guna de Apoyo	1320867	605530	73	PE	25	940	0.47	31.3	7.43	9.6	11.1 3
9		Monte Cristo	Granada	Plan de la La- guna de Apoyo	1320871	605460	70	PE	43	1070	0.54	30.8	7.87	11.5	11.6 5
3	9/5/19														
10		Ernesto Cordero	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1320686	604932	73	PE	0	1160	0.58	32	7.83	3.78	4.89
11		Casa de Verano	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1320437	604561	77	PE	24	750	0.373	31.4	8.05	9.44	10.4 5
12		Casa Martha	Catarina	Plan de la La- guna de Apoyo	1320447	604497	85	PE	28	710	0.36	31.6	8.11	17.77	19.9

13		Topochiva	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1320514	604587	78	PE	30	520	0.26	32.1	8.27	13.5	15.48
14		Quinta El Carmelo	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1320420	604462	86	PE	45	450	0.23	31.8	8.32	16.61	18.15
15		Punta El Cacique	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1320380	604394	76	PE	53	730	0.37	31.5	8.14	6.15	10.62
16		Casa de las Aves	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1320109	603699	78	PE	0	380	0.19	30.4	8.07	5.98	8.1
4	15/5/19														
17		Juan José Romero Baldano	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1320104	603688	76	PE	5	430	0.22	29.2	7.75	8.37	9.7
18		Laguna Shore Guesthouse	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1319896	603455	84	PE	3	320	0.16	29.2	7.19	9.5	10.81
19		Quinta Meneses	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1319801	603392	75	PE	3	340	0.17	30.9	7.33	3.98	5.2
20		Cuerpo de paz	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1319814	603241	80	PE	0	350	0.18	29.7	7.43	13.52	14.14
21		Bar y restaurante María	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1319656	603172	64	PE	0	390	0.19	30.5	7.6	3.24	5.65
22		Restaurante Los Ranchos	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1319707	603185	69	PE	0	340	0.17	30.7	7.56	8.65	9.54
23		Bladimir Rosales	Catarina	Plan de la Laguna de Apoyo	1318901	602918	79	PE	70	840	0.42	33.5	7.67	1.85	4.13

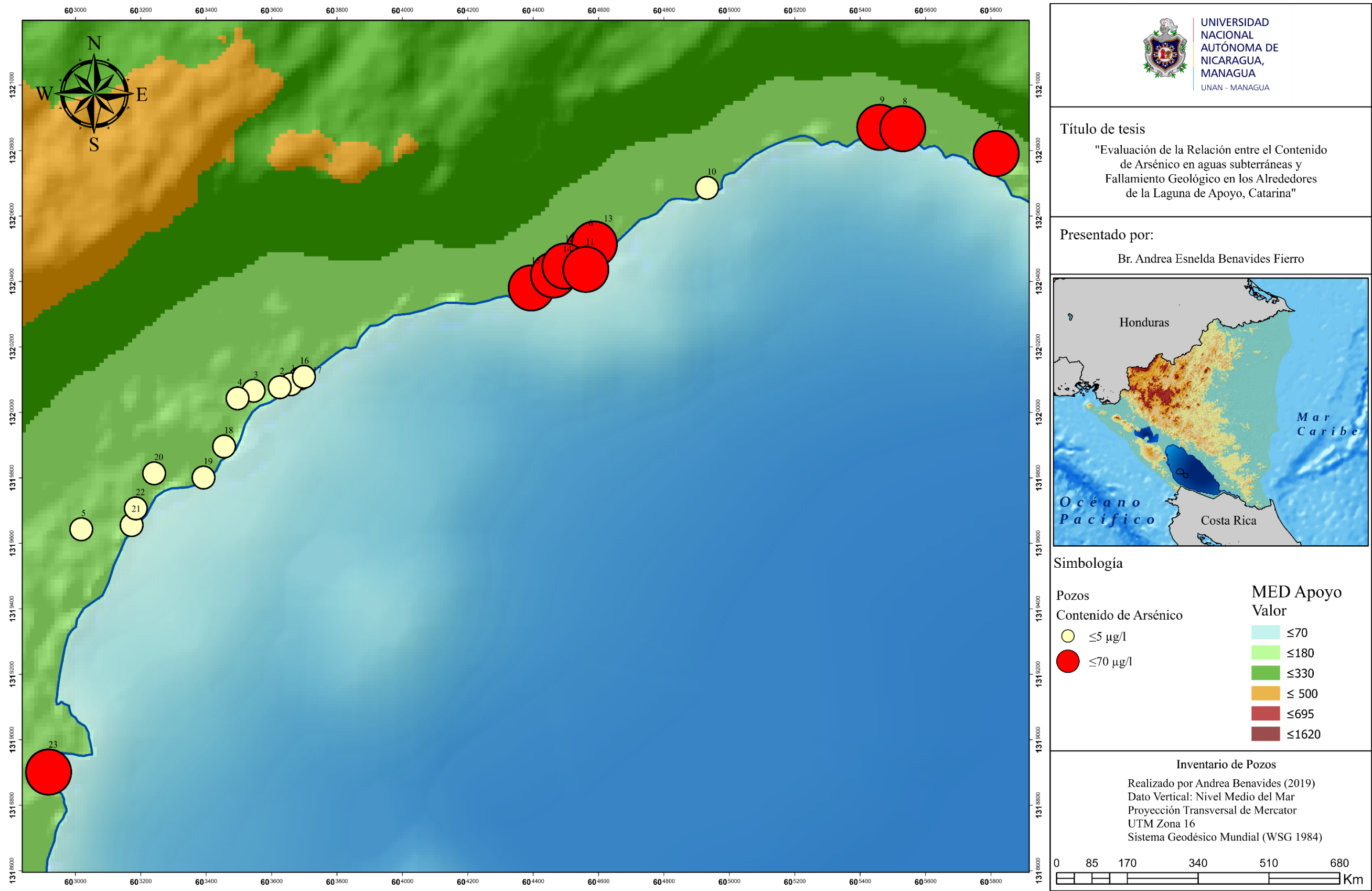


Figura 19. Inventario de pozos.

4.1.5. Hidrogeología

4.1.5.1. Piezometría

Para la elaboración del mapa piezométrico (Figura 20) se utilizaron los datos de los pozos obtenidos en campo, pero también se utilizaron datos de Vázquez et al., 2007 durante la etapa de verano al para tener una mejor distribución espacial de las líneas equipotenciales, ya que los 23 pozos analizados en este estudio no tenían una buena distribución espacial. Para la elaboración de las líneas equipotenciales se utilizó el programa Surfer 14, con el método de interpolación kriging.

En el área de estudio los niveles piezométricos van desde 70 m en la parte más baja de la Laguna hasta los 90 m en la zona Noroeste (Figura 20). Como se observó la red de drenaje del interior de la Caldera nace en los bordes del mismo desde las zonas más altas, eso sobre todo se puede apreciar en la zona Norte y Noroeste de la Laguna; ya que en la zona Sur como se mencionaba en el análisis de foto interpretación la red de drenaje es tipo paralelo.

De acuerdo a las líneas de flujo que van hacia la Laguna se tienen en la zona Sur, Suroeste y Noroeste. En la Figura 20 se observa en la zona Noroeste que el flujo es multidireccional, de acuerdo a las líneas equipotenciales; aquí se tienen pozos con concentraciones bajas de As posiblemente indicando un aporte de flujo subterráneo. Mientras en la zona Norte el comportamiento del flujo subterráneo según las equipotenciales van en dirección Noroeste-Sureste donde se ve que el flujo es ligeramente desviado de los pozos registrados con altas concentraciones de As, indicando probablemente que en esta zona se recibe poca aportación de flujo subterráneo. El comportamiento del flujo subterráneo en esta área podría obedecer a la presencia de fallas.

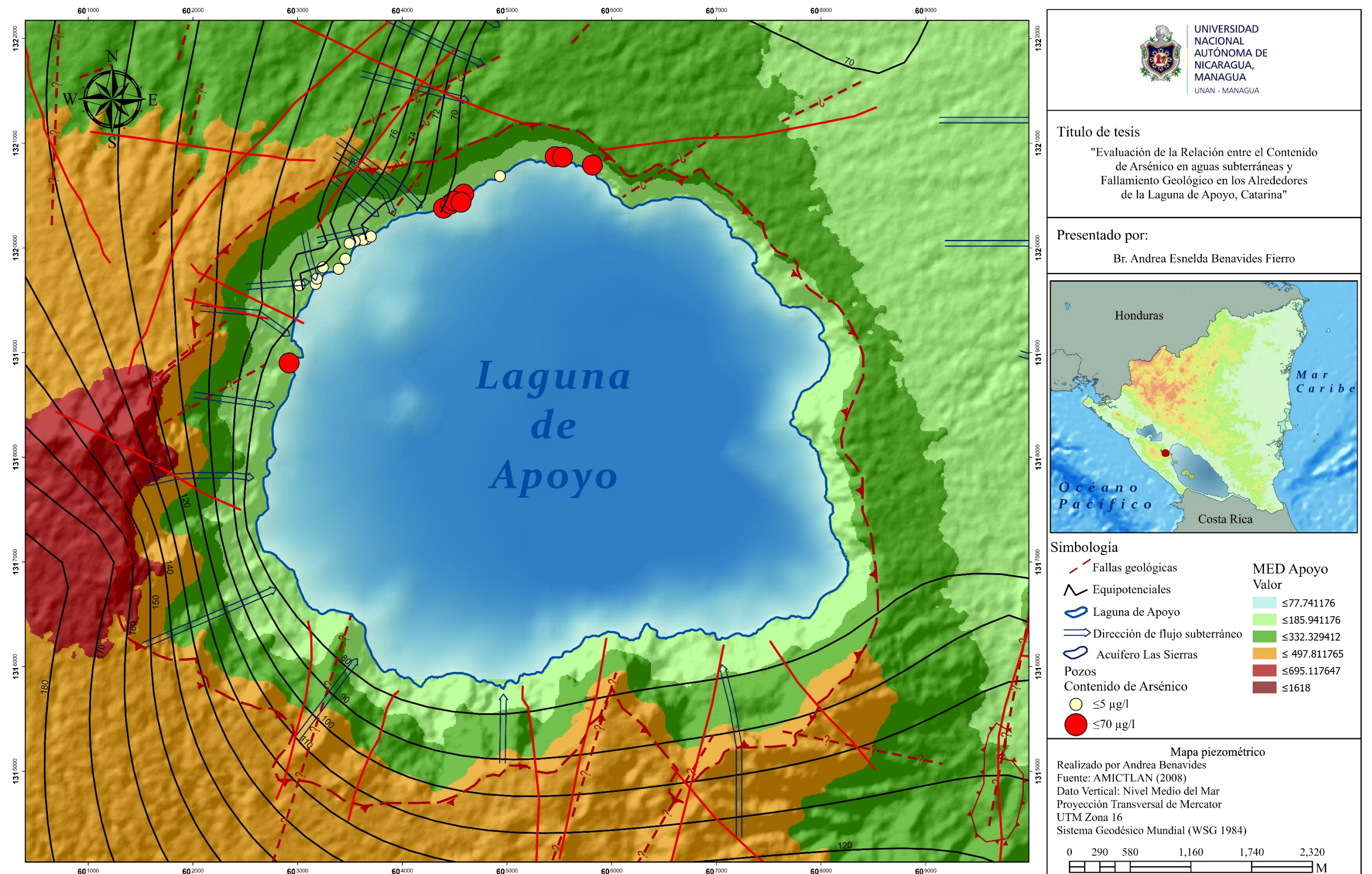
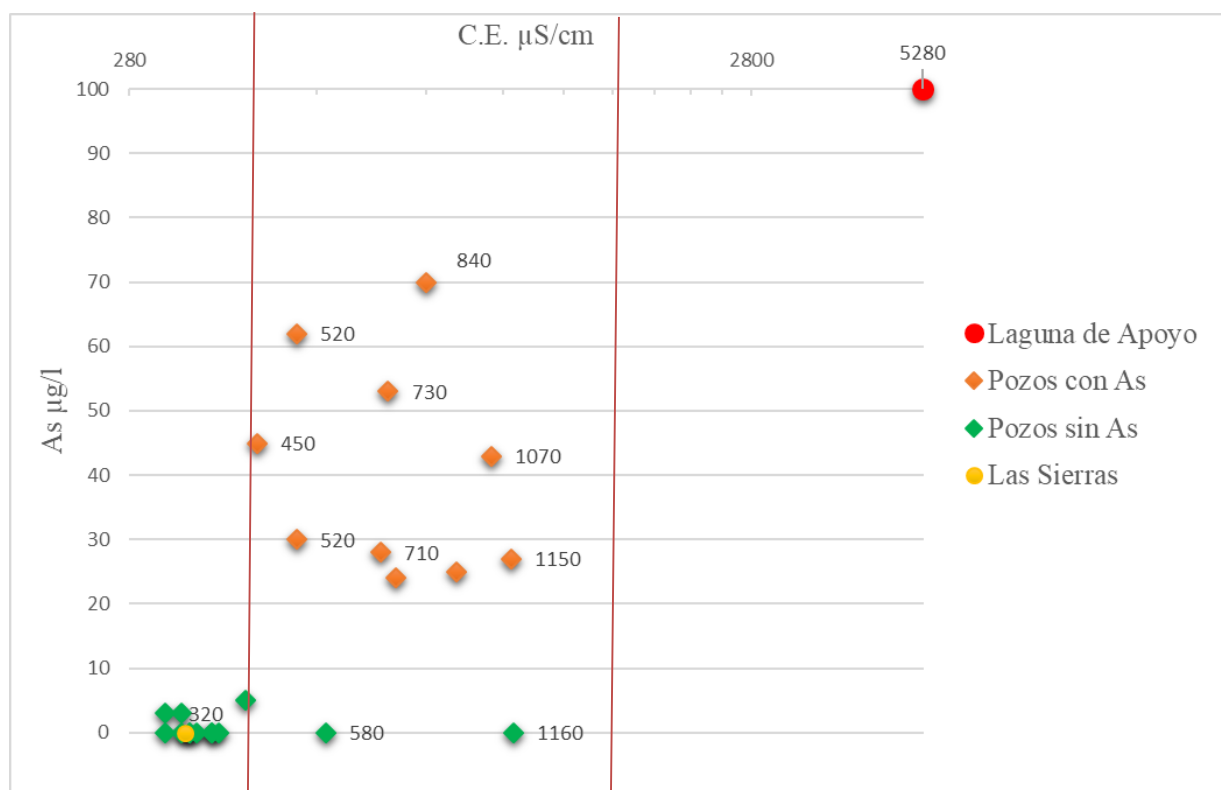


Figura 20. Mppiezométrico

4.1.6. Hidroquímica de las aguas subterráneas

Relación entre Arsénico y Conductividad Eléctrica

En los resultados de los datos obtenidos de las concentraciones de As y las Conductividades eléctricas se puede decir que existe una relación, las conductividades entre 320 $\mu\text{S/cm}$ hasta 450 $\mu\text{S/cm}$ muestran tener rangos de As bajos (Figura 21, en color verde), esto a excepción de dos pozos registrados con conductividades de 580 $\mu\text{S/cm}$ y 1160 $\mu\text{S/cm}$. Otros pozos que se registraron con conductividades entre 450 $\mu\text{S/cm}$ y 1150 tienen registros de alto contenido de As (Figura 21 en color naranja).



En la Figura 21 se pueden diferenciar 3 datos diferentes en dependencia a las concentraciones de As y los datos de las conductividades eléctricas. Los resultados de la Laguna se muestran elevados en ambos parámetros, y como se muestra en la Tabla 2. Inventario de pozos. el As es mayor a 100 $\mu\text{g/l}$ y la conductividad de 5,280 $\mu\text{S/cm}$. En la Figura 21 color naranja se muestran los que corresponden a pozos con registros de As mayores a 20 $\mu\text{g/l}$ y la conductividad también es elevada. Finalmente, el último resultado señalado en color verde con concentraciones bajas en As y en las conductividades. Una excepción que se presenta en dos pozos (pozos número 2 y 10, ver Tabla 2), éstos pozos a pesar de no presentar concentraciones elevadas de As tienen conductividades altas, lo que podría deberse a contaminación antrópica haciendo que la conductividad sea elevada.

Se realizó una comparación en el sector donde predominan bajas conductividades (Figura 21, en color verde) con la conductividad del acuífero regional (Figura 21, color amarillo) datos obtenidos de Vázquez et al., (2007), indicando que la fuente de estas aguas subterráneas podrían provenir del acuífero regional ya que las conductividades en ambos se muestra similar. En la Figura 47 se puede apreciar que los pozos con bajas concentraciones de As se encuentran en una zona con alto nivel de fracturamiento indicando probablemente que el flujo subterráneo obedece a las fracturas presentes; estas fracturas presentan direcciones N 10° E, S 10° O y N 15° O lo que en comparación con la dirección de flujo subterráneo (Figura 20) se observa que este es en múltiples direcciones. Acorde a la Figura 4 donde se muestra la litología en esta zona predomina material coluvial, y grandes depósitos de pómez; factor que también podría facilitar la infiltración de agua subterránea hacia estas aguas locales sabiendo que la pómez es un material poroso; lo que ayudaría a la dilución del As y en consecuencia los rangos de este metal son menores a 10 $\mu\text{g/l}$.

Por otra parte, se tienen pozos con conductividades entre 450 $\mu\text{S/cm}$ y 1150 $\mu\text{S/cm}$ (Figura 21, en color naranja) y rangos de As mayores a 20 $\mu\text{g/l}$; estos datos de conductividad y As se muestran en un área intermedia entre aguas de la Laguna y aguas subterráneas de los pozos con baja conductividad eléctrica, lo que según Vázquez et al., (2007) esto podría ser causa de una mezcla de aguas entre aguas subterráneas locales y aguas de la laguna. Lo que hace diferente a

estos pozos es que las concentraciones de As son elevadas, esto se puede explicar con los datos de piezometría (Figura 20) donde se logra visualizar que la dirección de flujo en trayectoria a los pozos con alto As no es muy evidente, este flujo tiene una orientación Noroeste- Sureste. Según la Figura 4, donde se muestra la litología de Toba que corresponde al Grupo Las Sierras, material poco poroso y compacto, algunos afloramientos muestran fracturas, sin embargo, este se atribuye a la caída de material de bloques. Por tanto, en esta zona no ocurre dilución de As y las concentraciones se muestran en un rango mayor a 20 $\mu\text{g/l}$.

Un pozo diferente se puede apreciar en la Figura 21, sus aguas tienen un comportamiento similar a las aguas superficiales de la Laguna de Apoyo (pozo Bladimir Rosales) con una conductividad eléctrica de 840 $\mu\text{S/cm}$, éste fue el pozo con mayor concentración de As registrado (70 $\mu\text{g/l}$), se encuentra aproximadamente a 15 m de la laguna, el nivel de agua se encuentra somero (1.85 m) y la distancia del pozo hacia la laguna es de aproximadamente 1 m, probablemente este pozo tenga influencia del agua de la laguna.

4.1.7. Composición isotópica

Se realizó un análisis de 9 muestras en total de los isótopos $\delta D\text{‰}$ y $\delta^{18}O\text{‰}$ los cuales fueron analizados en el laboratorio CIRA/UNAN-Managua. De éstas muestras 2 pertenecen a aguas superficiales de la Laguna de Apoyo y 7 muestras a aguas subterráneas de pozos, de los cuales 4 fueron tomados con registros elevados de As y el resto sin presencia de As, en la Tabla 3 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 3. Resultados de isótopos.

<i>Muestra</i>	$\delta D\text{‰}$	$\delta^{18}O\text{‰}$	As
<i>Laguna de Apoyo</i>	8.50	2.64	100
<i>Laguna de Apoyo</i>	10.20	2.68	100
<i>Bladimir Rosales</i>	9.30	2.69	70
<i>Estación Richard-son</i>	-34.60	-4.76	27
<i>El Cacique</i>	-42.50	-6.24	53
<i>Casa de Verano</i>	-42.00	-6.16	24
<i>Pozo alcaldía</i>	-47.00	-7.19	0
<i>Casa de las Aves</i>	-44.80	-6.66	0
<i>Ernesto Cordero</i>	-37.90	-5.39	0

De acuerdo al contenido isotópico se observa claramente las distintas fuentes de agua muestreadas, el primero corresponde a la Laguna de Apoyo la que muestra valores altamente enriquecidos en isótopos, el pozo Bladimir Rosales mostró una composición isotópica similar a las aguas de la laguna, lo que podría indicar que este pozo está siendo alimentado desde la misma fuente en profundidades a la Laguna, lo que se apoya con las características mencionadas en la discusión de As y las conductividades eléctricas sobre este pozo.

Por su parte, los resultados de las aguas subterráneas muestran estar más empobrecidos en isótopos pesados, entre ellos se encuentran pozos con altas y bajas concentraciones de As; lo que podría ser un indicador de mezcla entre aguas locales en el área de la laguna y aguas subterráneas del acuífero regional. Según la Figura 22 se observa que el pozo Ernesto Cordero se encuentra en una línea de mezcla entre dos pozos con alto contenido de As, este pozo fue de discusión anterior, donde se observa que presenta altas conductividades eléctricas y también la composición isotópica indica ser distinta a los dos tipos de aguas subterráneas generales que se han presentado; como los isótopos que se analizan son parte de la molécula de agua tienden a ser sensibles a procesos físicos como evaporación, condensación o mezcla, probablemente la composición isotópica de este pozo y la conductividad eléctrica representan que sus aguas provienen de una fuente distinta.

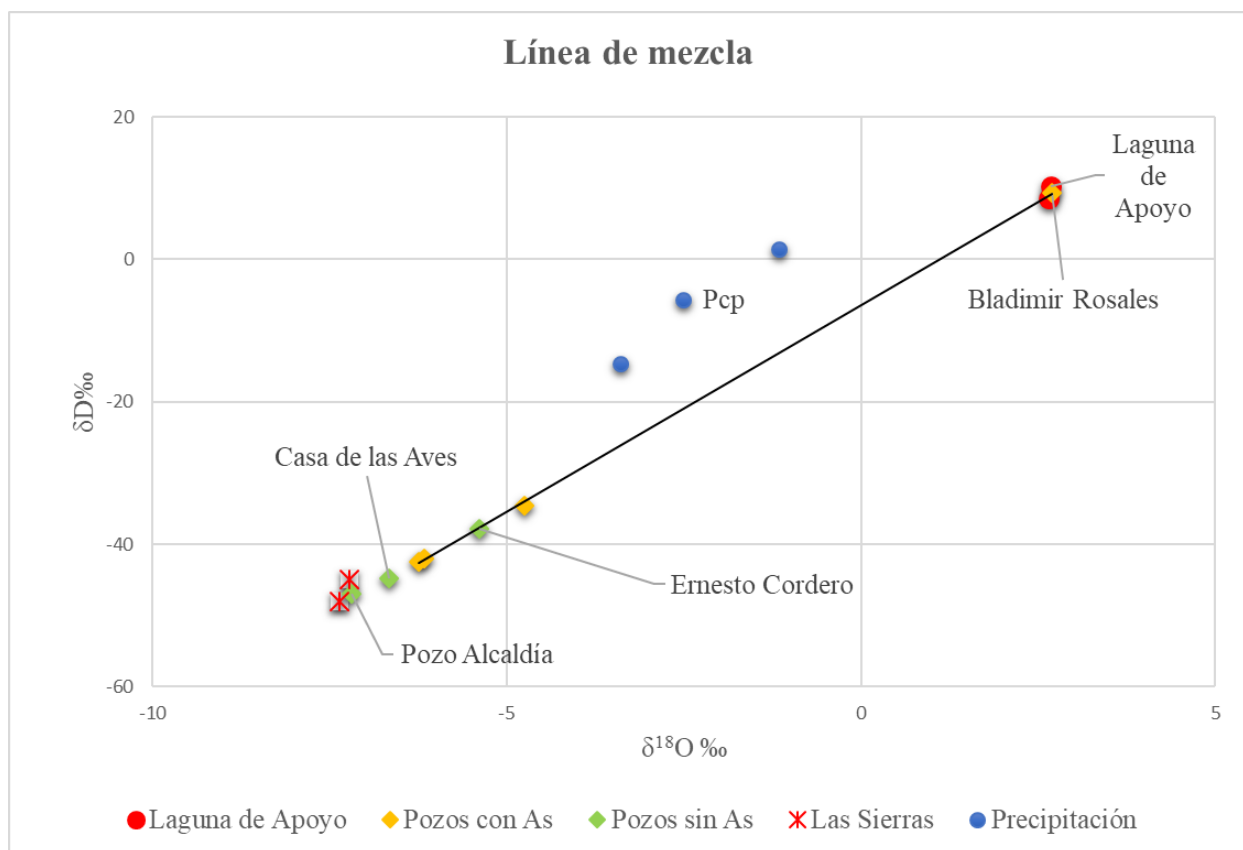


Figura 22. Línea de mezcla.

Para un mejor análisis de los datos de isótopos se ingresaron datos de precipitación y del acuífero regional Las Sierras, esto con el objetivo de comparar los datos. Puede apreciarse en la

Figura 22 que el pozo Bladimir Rosales muestra un comportamiento similar a las aguas de la Laguna, y en otro extremo se tienen datos de Las Sierras donde el Pozo Alcaldía muestra un comportamiento similar a las aguas del acuífero regional, lo que indicaría una alimentación desde esta fuente.

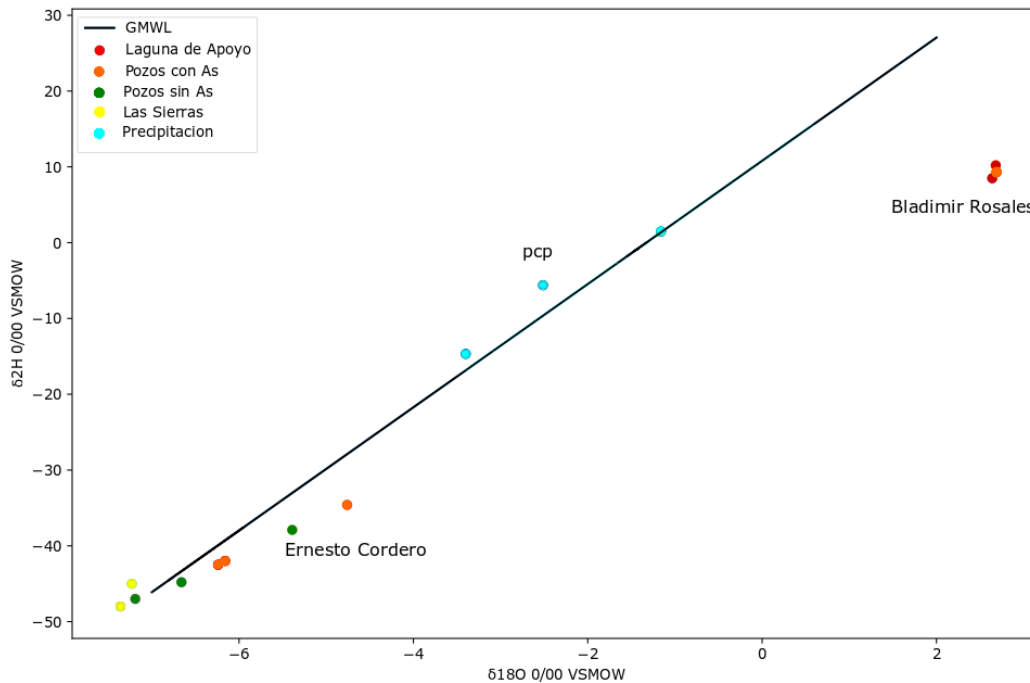


Figura 23. Línea meteórica.

En la Figura 23 se muestra la línea meteórica para el área de estudio, según los datos se podría concluir que los pozos que se encuentran en la parte izquierda por debajo de la línea meteórica han sufrido evaporación desde una superficie antes de infiltrarse, lo que podría indicar que esta fuente de flujo proviene de aguas evaporadas desde la Laguna de Apoyo, aguas que son mezcladas con el flujo regional y que por las condiciones antes mencionadas en As vs Conductividad eléctrica en unas zonas se concentra más el As, y en otros por mayor aporte regional el As logra diluirse.

4.1.8. Modelo Conceptual

En la Figura 24 se muestra un modelo de dos pozos, el pozo 5 de la Alcaldía de Catarina, tiene una profundidad de 42.7 m y el nivel de agua se encuentra a 12.28 m; este tiene una conductividad eléctrica baja ($320 \mu\text{S}/\text{cm}$), el pozo está asentado sobre una capa fina de arena, por encima se tiene una toba pomácea con fracturas, sigue una capa de aglomerados con fragmentos de basalto y pómez, y en la capa superior se tienen depósitos coluviales y sedimentos del cuaternario. Este pozo se encuentra a 92 m.s.n.m., como se observa en la Figura 22 es alimentado por el acuífero regional Las Sierras.

El pozo 22 Bar y Restaurante María se encuentra a 82 m.s.n.m, tiene una conductividad eléctrica baja al igual que el pozo anterior ($390 \mu\text{S}/\text{cm}$), una profundidad de 5.65 m y el nivel de agua se encuentra a 3.24 m; este pozo es alimentado tanto por aguas pluviales, probablemente también es alimentado a través de permeabilidad secundaria por los depósitos de toba pomácea fracturada. El perfil trazado se encuentra en el área donde las concentraciones de As son menores a $5 \mu\text{g}/\text{L}$.

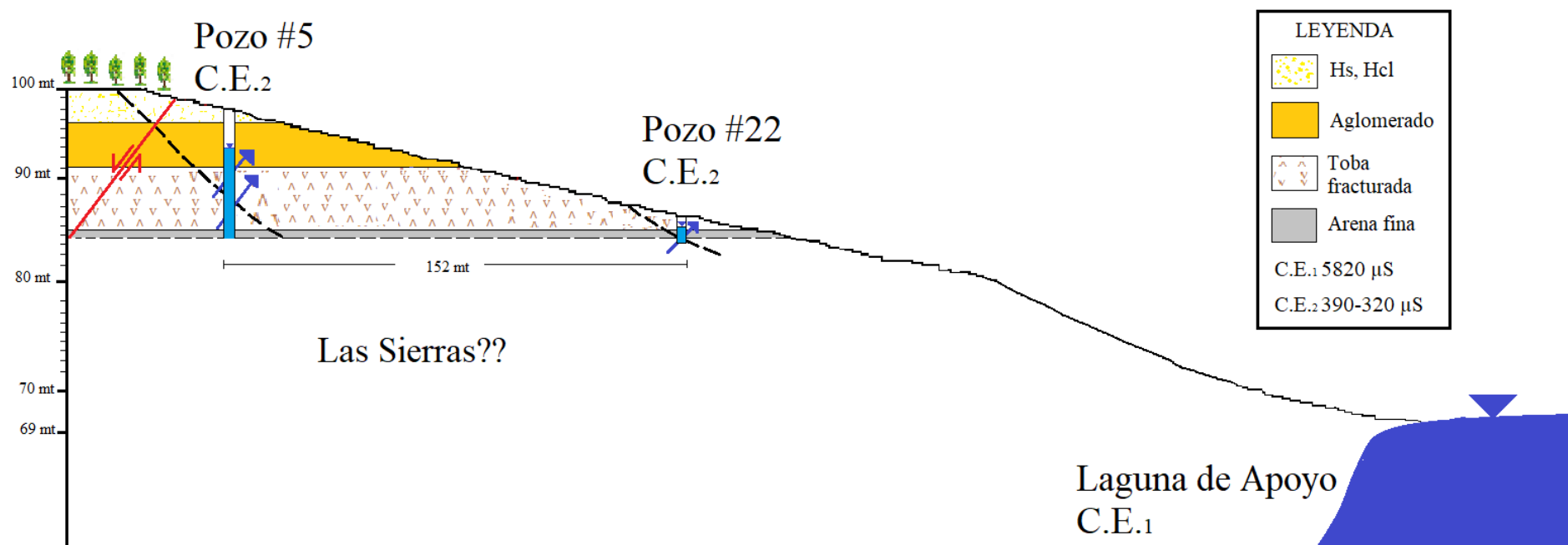


Figura 24. Modelo conceptual en pozos sin As.

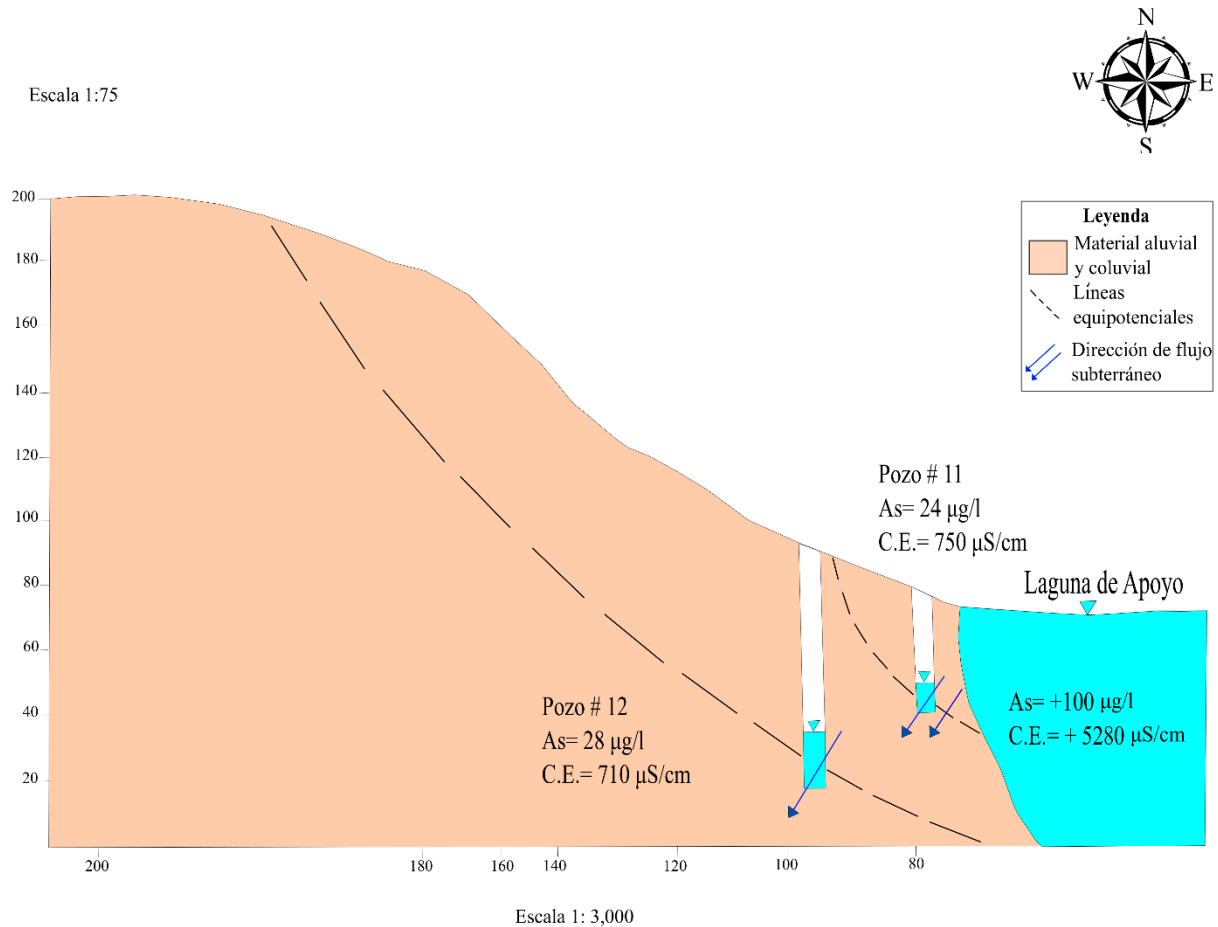


Figura 25. Modelo conceptual en pozos con As.

En la Figura 25 se puede observar un perfil donde se muestra la dirección del flujo subterráneo desde el pozo No 12 hacia el pozo No 11, según este perfil se puede determinar que el flujo subterráneo va en dirección a la Laguna, también se muestra la línea probable de interfaz entre las aguas más densas de la Laguna de Apoyo con el agua subterránea que tiene conductividades más bajas. Estos pozos tienen concentraciones de As mayores a 20 µg/l, lo que podría indicar una mezcla entre las aguas subterráneas provenientes de los pozos y aguas con de la Laguna; en base a los datos analizados de las conductividades eléctricas y la composición isotópica se puede determinar esta mezcla.

Capítulo V

5.1. Conclusiones

En base a la posición geográfica de los pozos con diferentes concentraciones de As, las características de conductividades y el contenido isotópico se pudo encontrar de forma general dos tipos de aguas. En una zona se tienen pozos con un contenido de As mayor a 20 $\mu\text{g/l}$ y otra donde el contenido es menor a 10 $\mu\text{g/l}$, es diferencia de concentraciones está vinculada a una zona de fallamiento y un alto grado de fracturas; como se mostró en la discusión en el área con menor As las fracturas presentan varias direcciones mismo comportamiento que se tiene con el flujo subterráneo, lo que indica que en esta zona ocurre dilución de As por el aporte de un flujo subterráneo regional que ha sido comparado con varios datos lo que probablemente indica que es del acuífero Las Sierras y según el mapa piezométrico, se observan estas diferentes direcciones del flujo subterráneo. La composición isotópica en esta zona es empobrecida en isótopos pesados.

Por su parte, los pozos que tienen alto contenido de As se encuentran en una zona donde las fracturas presentes son superficiales y causadas por el desprendimiento de materiales de gran tamaño, en base al mapa piezométrico y el sistema de flujo subterráneo se observó que este no presenta mucho aporte hacia estos pozos con As, sino que muestran tener una dirección Noroeste-Sureste hacia el Lago Cocibolca o Granada.

En el área de estudio se observó que el pozo Bladimir Rosales puede estar siendo alimentado con agua directamente de la Laguna, ya que este pozo es somero y la distancia del pozo hacia la laguna es de alrededor de 1 m y su característica de conductividad y composición isotópica muestra ser similar al agua superficial de la Laguna de Apoyo, ambas muestras son enriquecidas en isótopos.

En el sitio no se pudo observar un desplazamiento de falla, por lo que para determinar la presencia se utilizaron indicadores secundarios como dirección de fracturas, deslizamientos y foto-interpretación. Sin embargo, en base al sistema de caldera y en base a los antecedentes se podría tener presencia de fallas tipo normal.

5.2.Recomendaciones

- Monitoreo de las características físicas y químicas de los pozos en los alrededores de la Laguna de Apoyo, como la alta salinidad de los pozos y las altas concentraciones de As en el agua subterránea de los pozos.
- Ampliar los datos de geología con perforaciones, para lograr obtener registros de las litoestratigrafías de la zona, disposición de fracturas en profundidad, presencia de fallas.
- Es necesario que la Alcaldía local pueda ejecutar métodos para la reducción de As en el agua de consumo de los pobladores a los alrededores de la Laguna de Apoyo, ya que durante el inventario de pozos muchos pobladores indicaron que el agua la utilizan en lavar alimentos, utensilios de cocina, baño y para riego. En Anexo 1 se muestra un método de reducción de este metal.
- Registro del uso que se da a los pozos que tienen concentraciones altas de As, con el objetivo de prevenir el consumo humano de estas aguas contaminadas, planificación de la extracción de agua subterránea que se obtiene de algunas quintas y hoteles.

Referencias

- Calderón Palma, H., & Flores Meza, Y. (2010). *Evaluación de la Dinámica de la Laguna de Apoyo mediante Trazadores Isotópicos y Geoquímicos*.
- CAPRE. *Norma Regional Capre.* , (2010).
- Carabantes, A. G., & Fernicola, N. A. G. G. de. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 39(4), 365–372. <https://doi.org/10.1590/S1516-93322003000400003>
- Castillo, B. (2011). *Comportamiento de tecnología Kanchan y Sono filter para la remoción de arsénico en aguas con concentraciones de 60 µg/l a 80 µg/l en la comunidad de Linda Vista del Municipio de Santa Rosa del Peñón* (Universidad Nacional de Ingeniería). Retrieved from <http://ribuni.uni.edu.ni/2081/1/PIENSA17.pdf>
- CLUSA, & FUNDECI/GAIA. (2009). *PLAN DE MANEJO RESERVA NATURAL LAGUNA DE APOYO*. 271.
- Cole, J. W., Milner, D. M., & Spinks, K. D. (2005). Calderas and caldera structures: A review. *Earth-Science Reviews*, 69(1–2), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.06.004>
- COSUDE. (2005). *Inestabilidad de laderas: Mapa de Amenazas, Recomendaciones Técnicas para su elaboración*. 60. Retrieved from <https://web-geofisica.ineter.gob.ni/proyectos/metalarn/deslizamiento.pdf>
- Espinoza Altamirano, M. (2005). *Distribución De La Contaminación Natural Por Arsénico En Las Aguas Subterráneas De La Subcuenca Suroeste Del Valle De Sebaco, Matagalpa-Nicaragua*. (Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-Managua). Retrieved from <http://repositorio.unan.edu.ni/2378/>

Espinoza, E. (2008). *Cartografía Geológica en la Reserva Natural Laguna de Apoyo y sus alrededores*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua UNAN-Managua.

FEDEMEX. (2018). FEDEMEX. Retrieved October 25, 2019, from <https://elperiodicodemexico.com/nota.php?id=870110>

Fenzl, N. (1989). 1989 Fenzel, Norbert *Nicaragua, clima, geografía y hidrogeología.pdf*.

Fernández, E. (2009). *Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo en las aguas*. Retrieved from [https://books.google.com.ni/books?id=zviWBAAQBAJ&pg=PA56&dq=diagrama+de+pi+per&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEWijxdeojIbiAhUIVN8KHdokCqYQ6AEILDAB#v=onepage&q=diagrama de piper&f=false](https://books.google.com.ni/books?id=zviWBAAQBAJ&pg=PA56&dq=diagrama+de+pi+per&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEWijxdeojIbiAhUIVN8KHdokCqYQ6AEILDAB#v=onepage&q=diagrama+de+pi+per&f=false)

Fundación del Río, M. (2009). *Yo vivo en la Cuenca 69*. Retrieved from [http://fundaciondelrio.org/files/doc/1250695295_Yo vivo en la cuenca 69.pdf](http://fundaciondelrio.org/files/doc/1250695295_Yo+vivo+en+la+cuenca+69.pdf)

Gat, J., G. W., & A.J. H. (2002). *Environmental isotopes in the hydrological cycle Volume II Atmospheric water* (Technical; M. W.G, Ed.). Retrieved from [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/global_cycle/Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle Vol 2.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/global_cycle/Environmental+Isotopes+in+the+Hydrological+Cycle+Vol+2.pdf)

Hodgson, G. (2000). *Geología Regional de Nicaragua (Introducción al léxico estratigráfico de Nicaragua).pdf* (Universida). Managua.

IAEA. (1997). Use of isotope techniques in lake dynamics investigations. *Final Research Coordination Meeting*, (March), 1–116.

Krasny, & Hecht, G. (1998). *Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacífico de Nicaragua Estudios Hidrogeológicos e*. 168.

- Lillo, J. (2002). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Retrieved from http://phys4.harvard.edu/~wilson/arsenic/pictures/arsenic_project_pict
- Llinares, M., Ortiz, R., & Mareeno, J. (n.d.). Riesgo Volcánico. In I. N. D. B. O. D. E. ESTADO (Ed.), *Ministerio General de Protección Civil y Emergencias (DIRECCION)*. Retrieved from <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/VLC-Guia-Riesgo-Volcanico.pdf>
- McDonnell, J. J., & Kendall, C. (1992). Isotope tracers in hydrology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 73(24), 260–260. <https://doi.org/10.1029/91eo00214>
- NTON 05 002-99. *Norma técnica obligatoria nicaragüense para el control ambiental de las lagunas cratéricas*.
- Ongley, L. K., Chambreau, S. D., Guenthner, A., Godaire, T. P., Vij, A., & Cheema, H. (2012). *Validating the Digital Arsenator® and a Composite Iron Matrix Arsenic Filter at the Arsenic Field Event, Boron, CA*. (Cim), 1–9.
- Parello, F., Aiuppa, A., Calderon, H., Calvi, F., Cellura, D., Martinez, V., ... Vinti, D. (2008). Geochemical characterization of surface waters and groundwater resources in the Managua area (Nicaragua, Central America). *Applied Geochemistry*, 23(4), 914–931. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.08.006>
- Ramírez, J. C., & Torrez, P. (2016). *Diseño de filtros de Bioarena para remover metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Fe) en aguas de uso doméstico* (Universidad Nacional de San Agustín). Retrieved from <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/1893/AMl1erajc.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santa Rosa Del Peñón, M. DE, Rolando Benito Castillo Tutor, I., Rodolfo Jaén Serrano Asesor, L., & Edouard Jacotin, I. (n.d.). *CIEMA-UNI*.

- Soler, A.; Otero, N.; Rosell, M.; Carrey, R.; Domènech, C. (2015). *Isótopos de la molécula del agua*.
- Sussman, D. (1985). Apoyo caldera, Nicaragua: A major quaternary silicic eruptive center. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 24(3–4), 249–282. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90072-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90072-1)
- UNICEF. (2004). *Contribución al estudio de cinco zonas contaminadas naturalmente por arsénico en Nicaragua*. 1–36. Retrieved from <https://www.unicef.es/sites/unicef.es/files/Deporte06.pdf>
- Vammen, K., Montenegro, S., Matínez, V., Flores, Y., Calderón, H., Chow, N., ... Zelaya, A. (2005). *Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua Informe sobre el Lago de Apoyo. I*.
- Vázquez, D., Ortega, J., Marín, A., & Cerrato, D. (2007). *Estudio hidrogeológico y gestión de los recursos hídricos en la Cuenca de la Laguna de Apoyo, Nicaragua*. 74. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/38156038/Hidrogeologico-Laguna-de-Apoyo>
- Well, R. (1980). *Geology of Central America* (Printed in).
- WHO. (2011). *Arsenic in drinking water.pdf*. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2011.05.002>
- Zuidam, R. (1985). *Aerial Photointerpretation Terrain Analysis Geomorpho Mapping* (p. 446). p. 446.

Anexos

Anexo 1.

Medidas de recomendación para reducir las concentraciones de As en las aguas subterráneas.

Para este trabajo se indagaron varios métodos de remoción de As, de los cuales el más completo y con un acceso bajo económicamente se considera el Filtro Kanchan, o remoción por adsorción de Fe.

El Filtro Kanchan fue desarrollado por investigadores del MIT⁷, EHPHO⁸ y RWSSSP⁹ de Nepal; éste método se basa en principios de filtración lenta de arena y absorción de As por hidróxido de Fe.

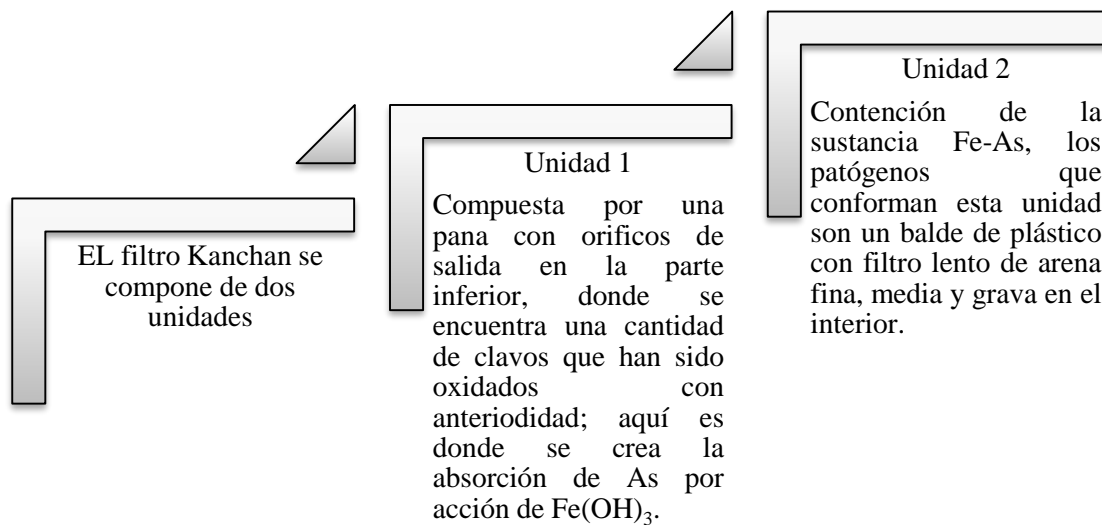


Figura 26. Componentes del filtro Kanchan

Fuente: (Castillo, 2011).

⁷ Massachusetts Institute of Technology

⁸Environment and Public Health Organization

⁹Rural Water Supply and Sanitation Support Programme

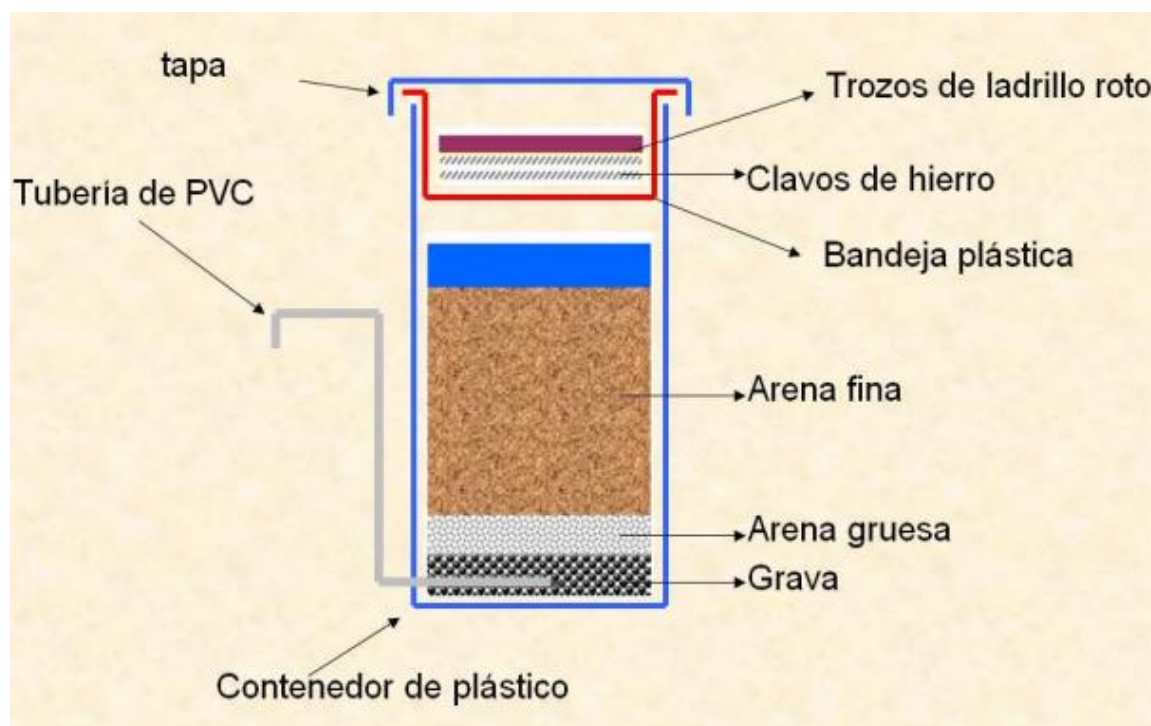


Figura 27. Componentes del Filtro Kanchan

Fuente: (Castillo, 2011)

Esta metodología ha sido utilizada en muchos países, incluyendo Nicaragua. En el estudio de Castillo, 2011 se aplicó este método para remover As el cual había sido objeto de estudio por UNICEF en 2004. Este fue aplicado en la comunidad de Linda Vista del Municipio de Santa Rosa del Peñón, en la Tabla 4 se muestran los resultados de la aplicación del Filtro Kanchan en aguas contaminadas por As en los rangos de 60 $\mu\text{g/l}$ a 80 $\mu\text{g/l}$.

Tabla 4. Resultados de la aplicación del Filtro Kanchan.

Fuente: (Castillo, 2011).

<i>Agua inicial con As $\mu\text{g/l}$</i>	<i>Agua con filtro $\mu\text{g/l}$</i>	<i>Remoción de As</i>	<i>% de remoción</i>
78	7.5	70.5	90.4
80	6.8	73.2	91.6
80	2.0	78	97.5
61	2.0	59	96.7
77	2.7	74.3	96.5
80	2.0	78	97.5
79	2.0	77	97.5

Estos análisis fueron realizados durante un lapso de 75 días, y se utilizó un volumen total 1.270 lt de agua con concentraciones de As variadas. Como se puede observar en la Tabla 4 la efectividad del método de remoción de As por Filtro Kanchan es muy alto, más del 90% del As contenido en el agua es removido, y este se encuentra por debajo del máximo admisible por la OMS y las Normas CAPRE.

Como parte de esta investigación se asistió a una charla sobre Remoción de As a nivel familiar impartida por el Ing. Sergio Gámez, patrocinada por ANISA y AMANCO donde también se trabajó con el Filtro removedor de As Kanchan, obteniendo resultados de más del 90% de remoción de este metal. También estudiaron y analizaron los costos que requiere la implementación de esta metodología, obteniendo un valor entre \$20 y \$22 por unidad. Este equipo tiene una vida útil entre 3 y 5 años.

Anexo 2.

Manual instructivo para realizar pruebas de Arsénico en aguas.

Digital Arsenator Palintest ZI INST 981

Materiales y equipo

- Analizador Digital de Arsénico
- Guantes látex
- Mascarillas (tapa bocas)
- Estándar pequeño
- Filtro eliminador de Sulfuro de hidrógeno
- Papel filtro rojo
- Papel filtro negro
- Erlenmeyer graduado
- Pinzas
- Filtro deslizante negro
- Filtro deslizante rojo
- Trampa tri-filtro
- Tabletas reactivas A2
- Polvo reactivo A1 (compuesto por ácido sulfanílico)
- Bolsas para desechos
- Tubo de dilución
- Agua des ionizada/ destilada
- Cepillo de limpieza de matraz
- Carta de colores
- Destornillador



Procedimiento

Antes de realizar alguna medición es necesario ejecutar un control en el aparato digital para comprobar siempre que funcione correctamente.

Preparación de los equipos

Para la lectura de concentración de arsénico se procede a colocar los papeles filtradores en cada filtro deslizante; para el filtro deslizante color rojo se introduce la tira reactiva del frasco con etiqueta “Red”; para el filtro deslizante color negro se introduce la tira reactiva del frasco con etiqueta “Black”. Se puede realizar una calibración del aparato digital utilizando el filtro negro, se presiona cualquiera de las dos teclas que tiene el aparato, este indica cuando se puede introducir el filtro y una vez lo salga en la pantalla se introduce el filtro deslizante negro y se retira cuando éste lo

indica. Luego se toma la trampa tri filtro y se coloca el filtro eliminador de Sulfuro de Hidrógeno en la parte superior, en el mismo tri filtro se colocan los dos filtros deslizantes (rojo y negro); el filtro negro en la parte inferior y el filtro rojo en la parte superior.

Preparación de la muestra

Con el matraz limpio (con el agua a analizarse o con agua des ionizada) se procede a llenar hasta 50 ml con el agua que requiere ser analizada, se debe tener listo las tabletas y el polvo reactivo, primero se coloca el polvo A1 y se introduce en el matraz con el agua, luego se introduce la tableta A2 tomando en cuenta que inmediatamente luego de colocar la tableta debe colocarse la trampa tri filtro sobre el matraz sellándolo, al introducir la tableta es recomendable que sea bien introducida, sin dejar restos en las paredes del matraz con el fin de utilizar bien toda la tableta reactiva.

Luego de esto se deja que reaccione la muestra en 20 minutos, el aparato digital tiene un cronometro con el cual se puede medir el tiempo, o bien usar un cronometro para esto; el tiempo inicia desde que se coloca la trampa tri filtro.

Medición del contenido de Arsénico

Una vez pasado los 20 minutos se retira el tri filtro del matraz, luego se retira de éste el filtro deslizante negro el cual si la muestra presenta algún grado de arsénico mostrará una coloración la cual se comparará con la tabla de colores la cual muestra de acuerdo al color en contenido de arsénico que presenta. Para una mejor exactitud del resultado se introduce el filtro deslizante negro en el aparato digital el cual arroja el resultado directo en $\mu\text{g/l}$.

Para finalizar las tiras reactivas se colocan en las bolsas de desechos especiales, para un mayor rendimiento del equipo el filtro de eliminación de Sulfuro de Hidrógeno se retira cuando en la parte superior empiece a oscurecerse.

Anexo 3.

Recopilación de información y equipo utilizado

Tabla 5. Recopilación de información.

<i>Nombre</i>	Tipo de información	Escala	Resolución	Formato	Autor	Año
<i>Mapa geológico de la Caldera de Apoyo</i>	Ráster	1:33 500	Media	JPG	David Susman	1982
<i>Mapa geológico Hoja Masaya 2951-I</i>	Ráster	1:50 000	Media	JPG	INETER	1972
<i>Mapa geológico Hoja Granada 3051-IV</i>	Ráster	1:50 000	Media	JPG	INETER	1972
<i>Mapa de la Caldera Volcánica Nicaragüense</i>	Ráster	1:200 000	Buena	JPG	Compilación por P. Hradecky, et al	2006
<i>Hoja Topográfica Masaya 2951-I</i>	Ráster	1:50 000	Buena	JPG	INETER	2006
<i>Hoja Topográfica Granada 3051-IV</i>	Ráster	1:50 000	Buena	JPG	INETER	2006
<i>Mapa geológico de la Reserva Natural Laguna de Apoyo</i>	Ráster	1:25 000	Buena	JPG	Espinoza, E; AMICTLAN	2008
<i>Mapa geomorfológico de la Reserva Natural Laguna de Apoyo</i>	Ráster	1:35 000	Buena	JPG	Espinoza, E; Espinoza, G; Delgado, F	2008
<i>Fotos aéreas línea de vuelo 8 y 9</i>	Ráster	1:40 000	Buena	TIFF	INETER	2004
<i>Ortofotomapas</i>	Ráster	1:10 000	Buena	TIFF	INETER	1996
<i>Mapa hidrogeológico Granada</i>	Ráster	1:250 000	Buena	JPG	INETER, COSUDE	1998
<i>Mapa hidroquímico Granada</i>	Ráster	1:250 000	Buena	JPG	INETER, COSUDE	1998
<i>Batimetría de la Laguna de Apoyo</i>	Vectorial		Buena	Shape	INETER, CIRA	2006
<i>Registro piezométrico</i>			Buena	xls	INETER	2008
<i>Registro piezométrico</i>			Buena	xls	AMICTLAN	2008

Apoyo Caldera, Nicaragua: A Major Quaternary Silicic Eruptive Center

Cartografía Geológica en la Reserva Natural Laguna de Apoyo y sus alrededores

Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacífico de Nicaragua

Informe sobre el Lago de Apoyo, Limnología, Calidad de agua, Hidrogeología e Hidrogeoquímica

Estudio Hidrogeológico y Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca de la Laguna de Apoyo, Nicaragua

Geochemical Characterization of Surface Waters and Groundwater Resources in the Managua área (Nicaragua, Central America)

Evaluación de la Dinámica de la Laguna de Apoyo Mediante Trazadores Isotópicos y Geoquímicos

Contribución al Estudio de Cinco Zonas Contaminadas Naturalmente por Arsénico en Nicaragua

Geológica		Buena	PDF	David Susman	1984
Geológica		Buena	PDF	Eveling Espinoza	2008
Hidrogeología e hidroquímica		Buena	PDF	Krasny & Hecht	1998
Hidrología e hidrogeología		Buena	PDF	Vammen et al	2005
Hidrología e hidrogeología		Buena	PDF	Vázquez et al.	2008
Hidroquímica		Buena	PDF	Parello et al	2008
Hidroquímica		Buena	PDF	Calderón Palma & Flores Meza	2010
Hidrogeología e hidroquímica		Buena	PDF	Espinoza Altamirano	2005

Contribución al Estudio de Cinco Zonas Contaminadas Naturalmente por Arsénico en Nicaragua

Geología ambiental		Buena	PDF	UNICEF	2004
--------------------	--	-------	-----	--------	------



Figura 28. Equipo para inventario de pozos.

28^a Equipo multiparamétrico 28^b Digital Arsenator Palintest 28^c Sonda de nivel de agua

Anexo 4.

Pozos inventariados



Figura 29. Pozo de la Alcaldía de Catarina.

Coordenadas 1319643, 603018

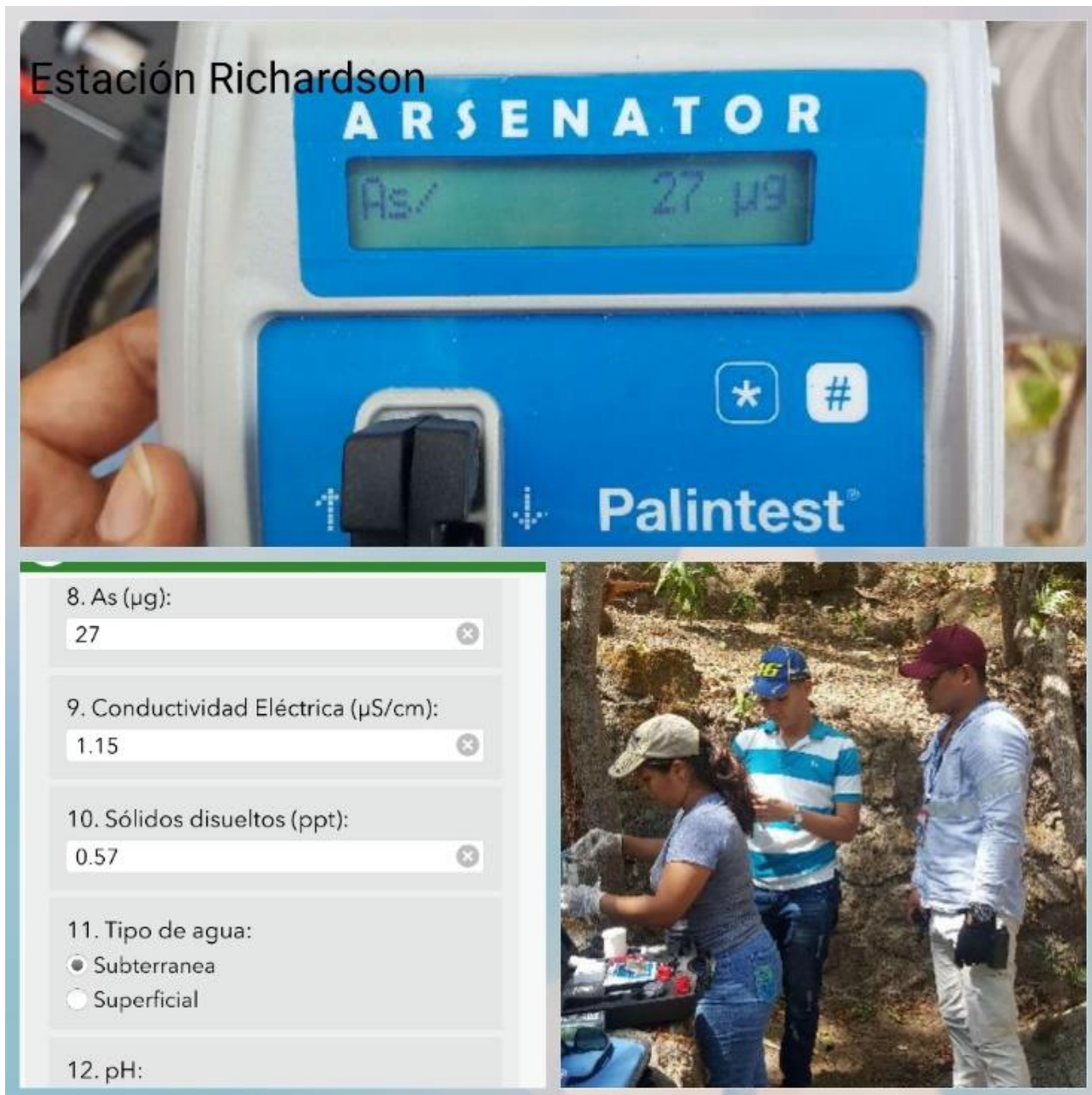


Figura 30. Pozo Estación Richardson.

Coordenadas 1320791, 605816

8. As (μg): Quinta Bladimir Rosales
70

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):
840

10. Sólidos disueltos (ppt):
420

12. pH:




Figura 31. Pozo Quinta Bladimir Rosales

Coordenadas 1318901, 602618

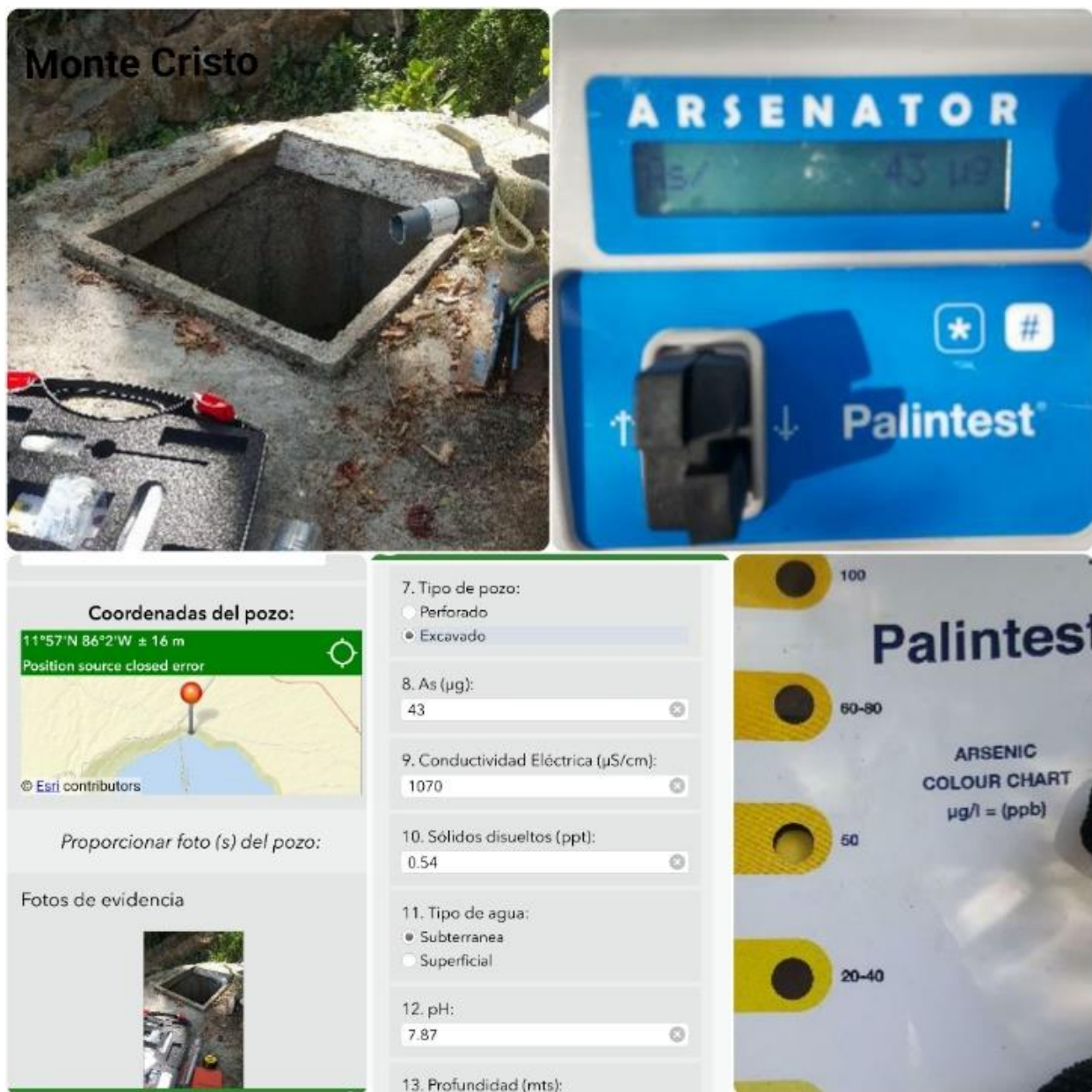


Figura 32. Pozo Monte Cristo
Coordenadas 1320871, 605460

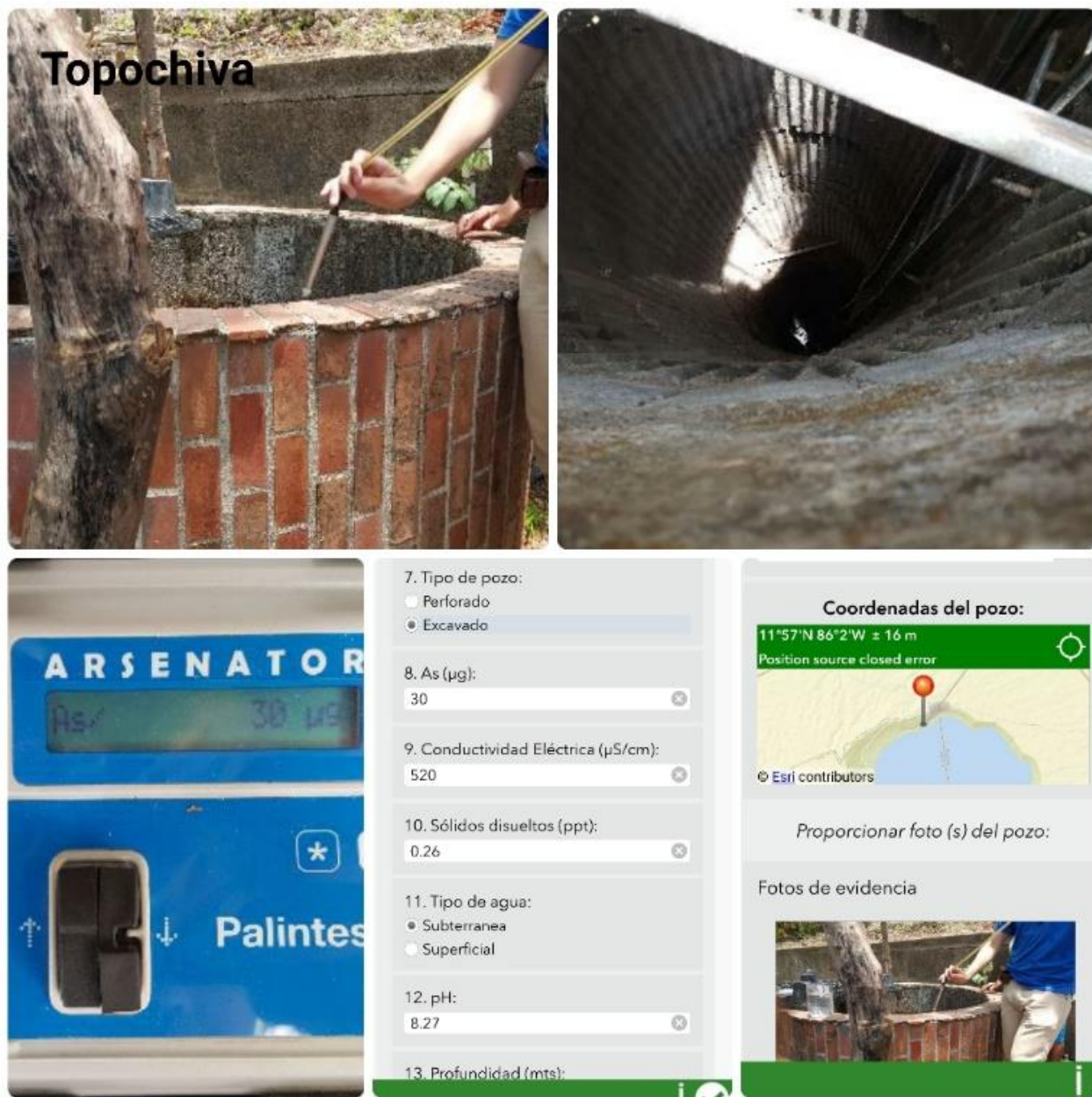


Figura 33. Pozo Topochiva
Coordenadas 1320514, 604587

8. As (μg):

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):

10. Sólidos disueltos (ppt):

11. Tipo de agua:
☒ Subterránea
☐ Superficial

12. pH:

Villa Serena

Coordenadas del pozo:

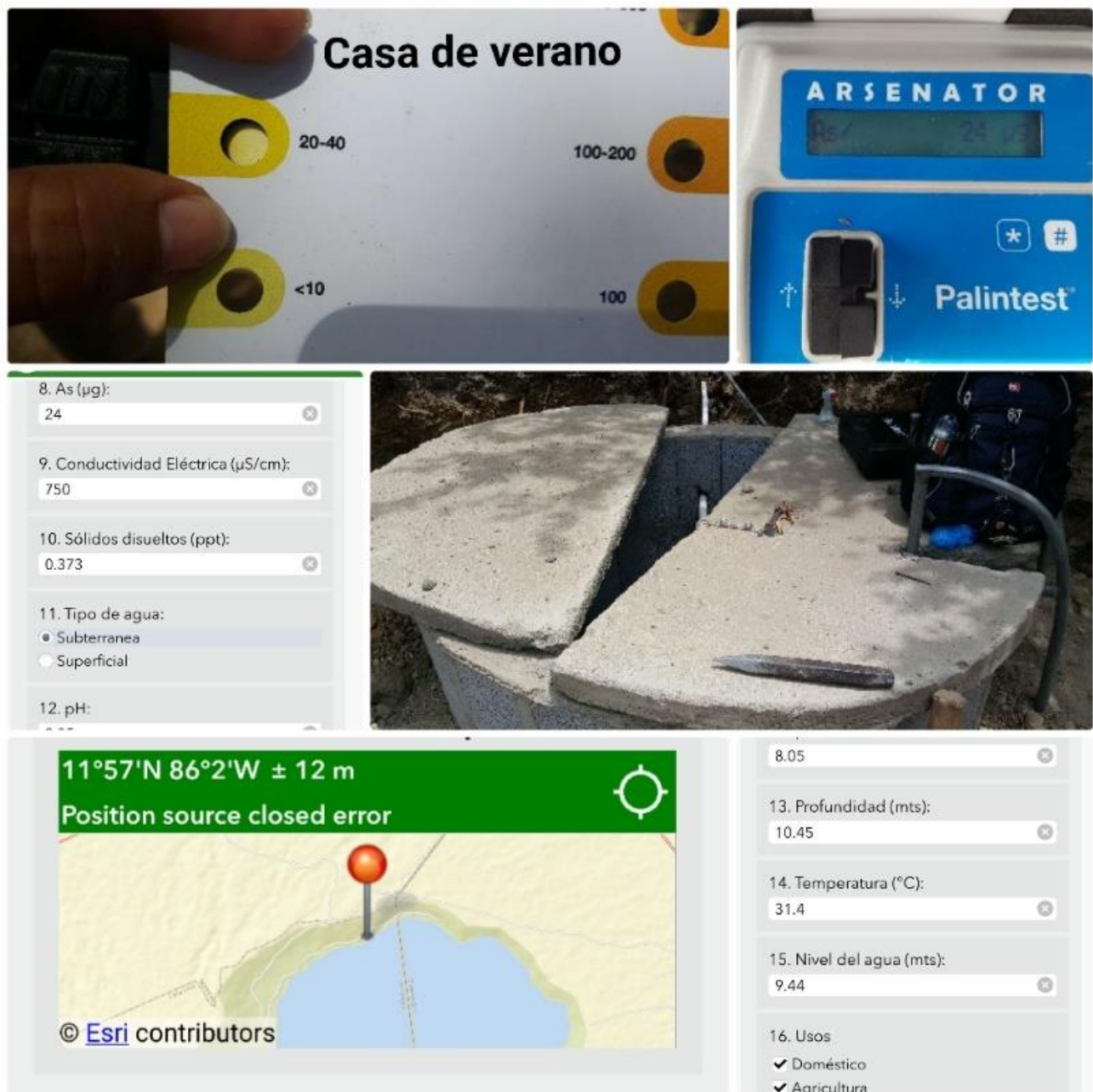
11°57'N 86°2'W \pm 12 m

© Esri contributors

Proporcionar foto (s) del pozo:

Fotos de evidencia

Figura 34. Pozo Villa Serena.
Coordenadas 1320867, 605530



*Figura 35. Pozo Casa de Verano.
Coordenadas 1320437, 604561*

8. As (μg):
45

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):
450

10. Sólidos disueltos (ppt):
0.23

11. Tipo de agua:
☒ Subterránea
☐ Superficial

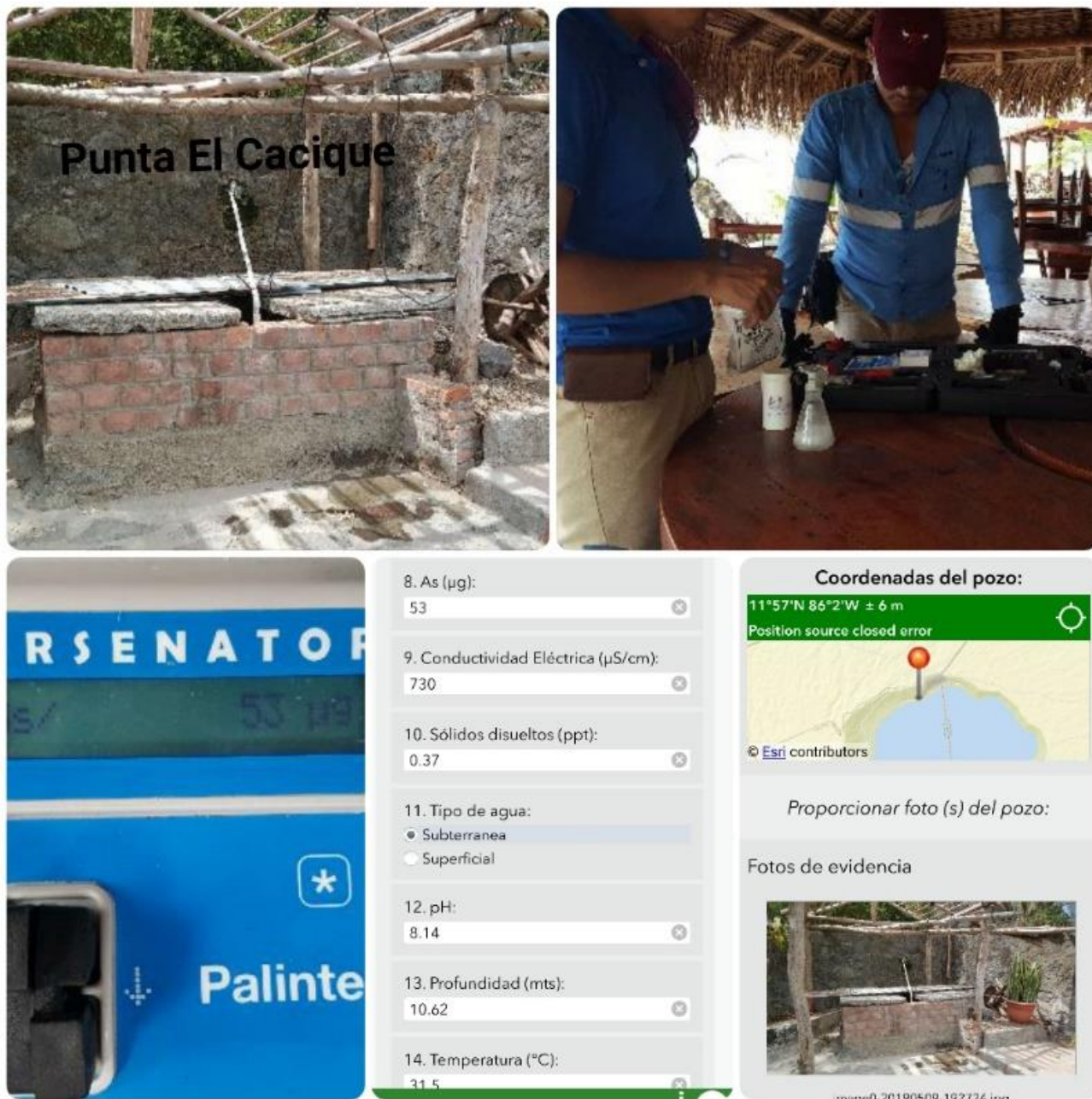
12. pH:
8.32

13. Profundidad (mts):
18.15

14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$):
31.8



Figura 36. Pozo Quinta El Carmelo
Coordenadas 1320420, 604462



*Figura 37. Pozo Punta El Cacique.
 Coordenadas 1320380, 604394*

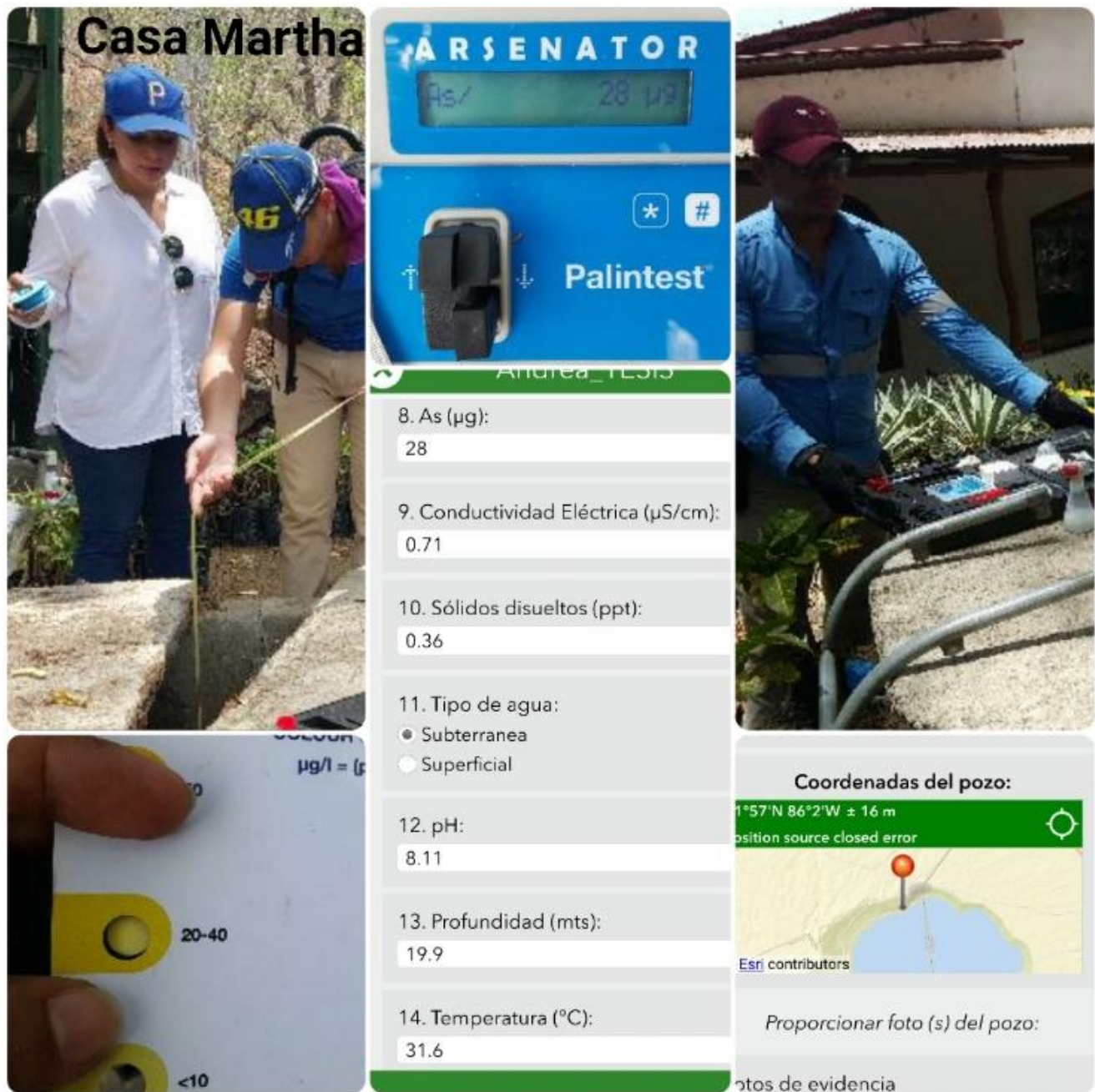


Figura 38. Pozo Casa Martha
Coordenadas 1320447, 604497

8. As (μg):	5
9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):	430
10. Sólidos disueltos (ppt):	0.22
11. Tipo de agua:	<input checked="" type="radio"/> Subterránea <input type="radio"/> Superficial
12. pH:	7.75
13. Profundidad (mts):	9.7
14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$):	29.2



Figura 39. Pozo Juan José Romero.

Coordenadas 1320104, 603688

8. As (μg):
3

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):
340

10. Sólidos disueltos (ppt):
0.17

11. Tipo de agua:
☒ Subterránea
☐ Superficial

12. pH:
7.33

13. Profundidad (mts):
5.2

14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$):
30.9



Figura 40. Pozo Quinta Meneses
Coordenadas 1319801, 603392

8. As (μg): **Bar y Restaurant María**
0

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
390

10. Sólidos disueltos (ppt):
0.19

11. Tipo de agua:
☒ Subterránea
☐ Superficial

12. pH:
7.6

13. Profundidad (mts):
5.65

14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$):
30.5



*Figura 41. Pozo Bar y Restaurante María
Coordenadas 1319656, 603172*

8. As (μg):
0

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):
350

10. Sólidos disueltos (ppt):
0.18

11. Tipo de agua:
☒ Subterránea
☐ Superficial

12. pH:
7.43

13. Profundidad (mts):
14.14

14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$):
29.7



*Figura 42. Pozo Cuerpo de Paz
Coordenadas 1319814, 603241*

8. As (μg): **Restaurant Los Ranchos**
0

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):
340

10. Sólidos disueltos (ppt):
0.17

11. Tipo de agua:
☒ Subterránea
☐ Superficial

12. pH:
7.56

13. Profundidad (mts):
9.54

14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$):
30.7



Figura 43. Pozo Restaurante Los Ranchos.

Coordenadas 1319707, 603185

8. As (μg):

0

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):

380

10. Sólidos disueltos (ppt):

0.19

11. Tipo de agua:

☒ Subterránea
☐ Superficial

12. pH:

8.07

13. Profundidad (mts):


8.1

14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$):

30.4

Coordenadas del pozo:

11°56'N 86°3'W \pm 12 m
Position source closed error



Proporcionar foto (s) del pozo:

Casa de las Aves





Figura 44. Pozo Casa de las Aves
Coordenadas 1320109, 603699

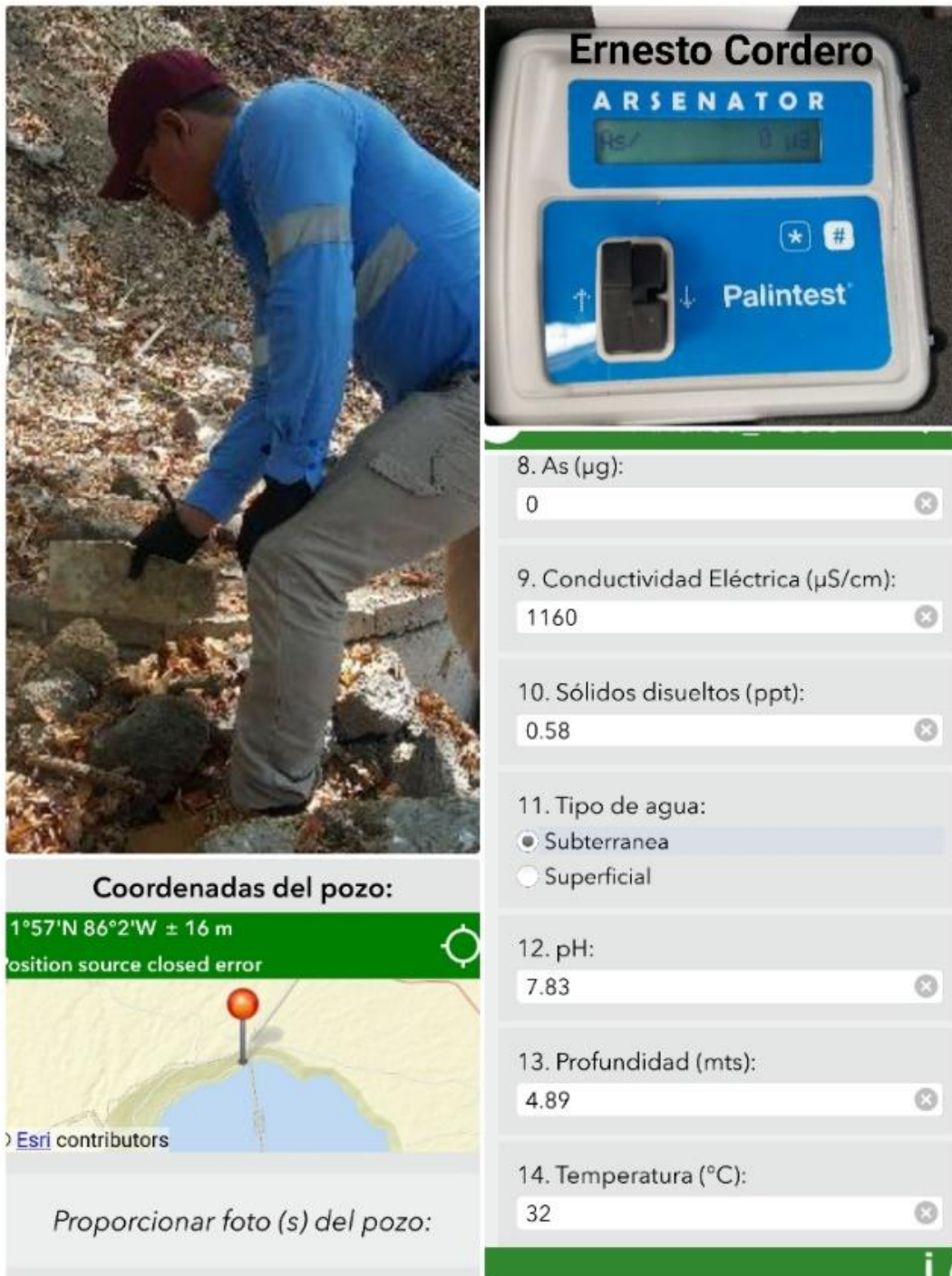


Figura 45, Pozo Ernesto Cordero
Coordenadas 1320686, 604932



Figura 46. Pozo Laguna Shore Guesthouse
Coordenadas 1319896, 603688

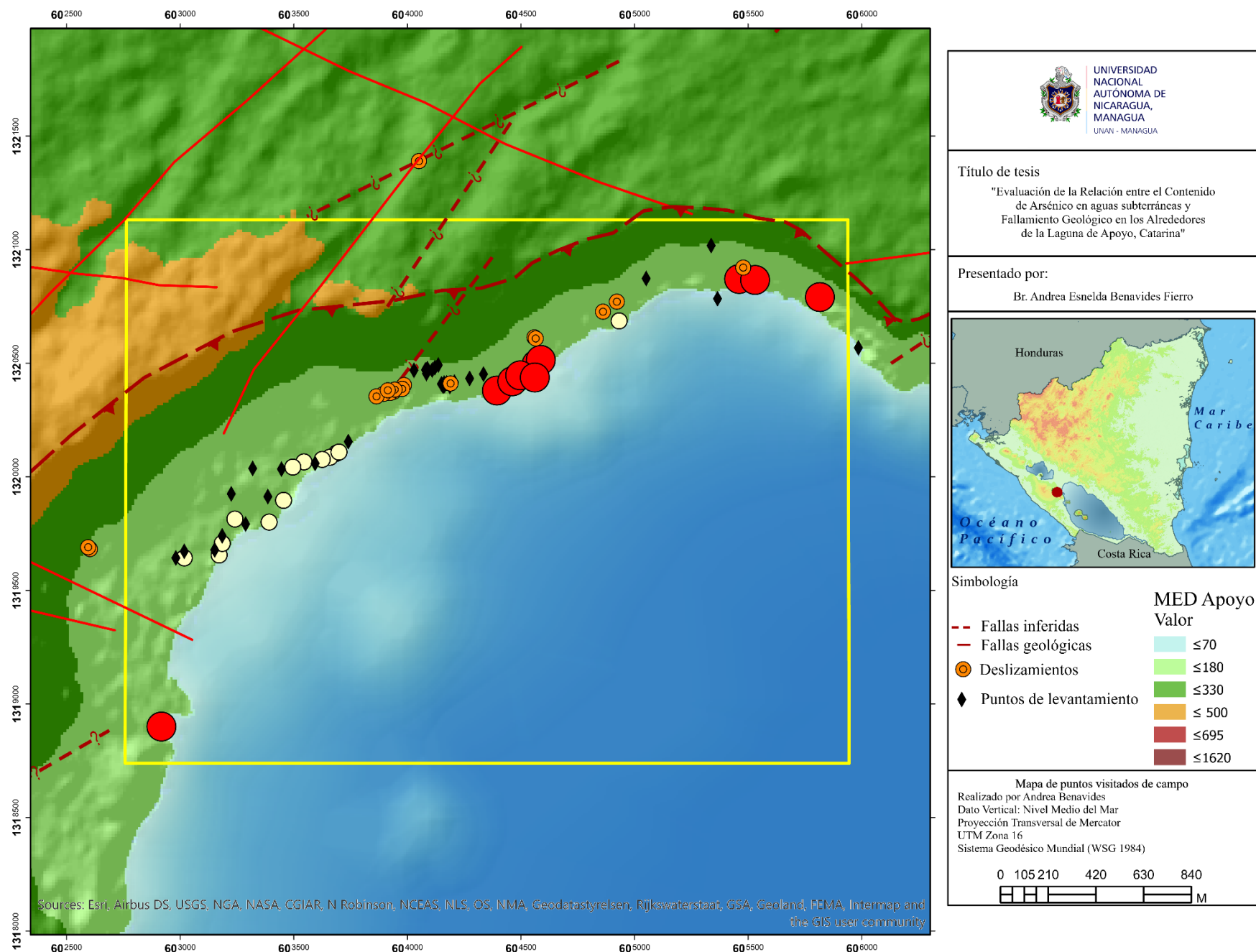


Figura 47. Mapa de trabajo en campo.